

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**METODOLOGIA DE EXPANSÃO AUTOMÁTICA DA
TRANSMISSÃO UTILIZANDO UM ALGORITMO DE
BUSCA TABU**

**‘Dissertação Submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para a Obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia Elétrica’**

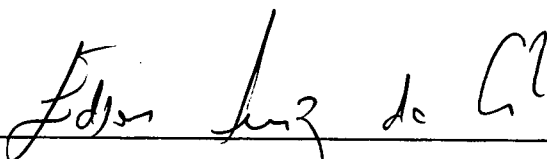
JORGE MAURICIO AREIZA ORTIZ

Florianópolis, Dezembro de 1997

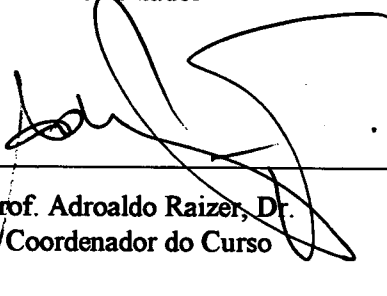
METODOLOGIA DE EXPANSÃO AUTOMÁTICA DA TRANSMISSÃO UTILIZANDO UM ALGORITMO DE BUSCA TABU

Jorge Mauricio Areiza Ortiz

Esta dissertação foi julgada para a obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Elétrica,
Área de concentração em Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica
e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação.

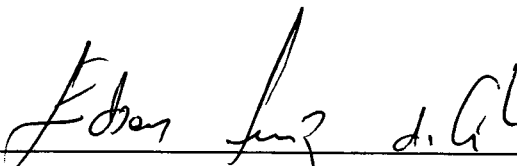
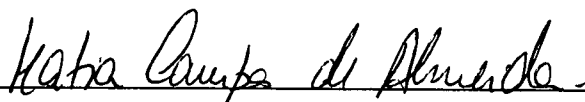

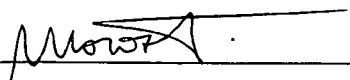


Prof. Edson Luiz da Silva, D. Eng.
Orientador



Prof. Adroaldo Raizer, Dr.
Coordenador do Curso

Banca examinadora


Prof. Edson Luiz da Silva, D. Eng. - Presidente
Prof. Kátia Campos Almeida, Ph.D
Prof. Ildemar Cassana Decker, D. Sc.
Prof. Marciano Morozowski Filho, D.Sc.

A Deus e a minha família.

À Monica e ao meu filho Juan Camilo que são a fortuna que eu tenho.
Aos meus pais Alberto e Dolly que estão sempre presentes na busca de minhas metas.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Edson Luiz da Silva, por sua orientação, apoio e amizade, que profissionalmente e pessoalmente me aportou tanto.

À Monica por seu apoio em todos os momentos vividos durante esta maravilhosa e inesquecível experiência, ao meu filho Juan Camilo por sua companhia e alegria.

Aos meus pais e irmãos que, a pesar da distância, sempre estiveram juntos conosco.

Aos amigos que sempre estiveram presentes, dos quais recebemos mensagens de afeto e amizade. Em particular agradecemos a Silvia, Leandro, Franz, Patrícia e Juan, Iara, Vânia e Wilmar, Hugo, Alexandra, Frank, Dairo, Juan Carlos, Ricardo, Nohemi e Juan Guillermo.

Ao Labplan pela excelente infra-estrutura oferecida, propiciando um ambiente de trabalho favorável.

Aos professores do curso de Pós-graduação de Engenharia Elétrica, representados particularmente pelos professores Ildemar Cassana Decker, Marciano Morozowski Filho, Jorge Coelho, Hans Helmut Zürn, Kátia Campos Almeida, que de uma ou outra forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao CEPEL pelo apoio institucional, em particular, aos pesquisadores Silvio Binato e Gerson Couto de Oliveira, pela orientação e grande aporte no desenvolvimento deste trabalho.

À Interconexión Electrica S.A. E.S.P., pelo apoio institucional e financeiro.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	4
2.1. INTRODUÇÃO	4
2.2. CONCEITUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	4
2.3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	5
2.3.1. MODELO DE TRANSPORTE	5
2.3.2. MODELO DE FLUXO DE POTÊNCIA LINEARIZADO	7
2.3.3. MODELO DE FLUXO DE POTÊNCIA NÃO-LINEAR	8
2.4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.4.1. SOLUÇÃO DO PROBLEMA	8
2.4.2. ALGORITMOS CONVENCIONAIS	10
2.4.3. ALGORITMOS DE SOLUÇÃO NÃO-CONVENCIONAIS	17
2.5. CONCLUSÕES	23
3. CONCEITOS BÁSICOS DE BUSCA TABU	25
3.1. INTRODUÇÃO	25
3.2. BASES DA BUSCA TABU	25
3.2.1. MOVIMENTOS	26
3.2.2. LISTA TABU	26
3.2.3. CRITÉRIO DE ASPIRAÇÃO	27
3.2.4. INTENSIFICAÇÃO E DIVERSIFICAÇÃO	27
3.2.5. CRITÉRIO DE PARADA	28

3.3. CONCLUSÕES	29
4. BUSCA TABU APLICADA AO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO	31
4.1. INTRODUÇÃO	31
4.2. DECOMPOSIÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO	31
4.3. ESTRUTURA GERAL DO PROCESSO DE BUSCA	33
4.4. PROCESSO DE EXPANSÃO DA REDE	35
4.4.1. CONECTIVIDADE INICIAL DA REDE	36
4.4.2. MOVIMENTOS NO PROCESSO DE EXPANSÃO	38
4.4.3. LISTA TABU	43
4.4.4. CRITÉRIO DE ASPIRAÇÃO	44
4.4.5. CONCEITO DE FREQUÊNCIA	46
4.5. PROCESSO DE INTENSIFICAÇÃO	51
4.5.1. PROCEDIMENTO DE INTENSIFICAÇÃO I	52
4.5.2. PROCEDIMENTO DE INTENSIFICAÇÃO II	55
4.6. PROCESSO DE DIVERSIFICAÇÃO	58
4.6.1. FREQUÊNCIA DE DIVERSIFICAÇÃO	59
4.6.2. LISTA TABU DE DIVERSIFICAÇÃO	60
4.7. CRITÉRIO DE PARADA E RESULTADO FINAL	61
4.8. PARÂMETROS DE ENTRADA E FLUXOGRAMA	63
4.9. CONCLUSÕES	65

5. RESULTADOS DA METODOLOGIA APLICADA A PROBLEMAS DE GRANDE PORTE	68
5.1. INTRODUÇÃO	68
5.2. CASOS TESTE ANALISADOS	68
5.2.1. SISTEMA SUL BRASILEIRO REDUZIDO (SU46)	68
5.2.2. SISTEMA SUDESTE BRASILEIRO (SE79)	69
5.3. PARÂMETROS DE BUSCA E A SUA INFLUÊNCIA NA SOLUÇÃO DO PROBLEMA	70
5.3.1. PARÂMETROS PADRÃO	71
5.3.2. SENSIBILIDADE AO TIPO DE REDE INICIAL	75
5.3.3. SENSIBILIDADE AO TIPO DE EXPANSÃO UTILIZADO	76
5.3.4. SENSIBILIDADE AO TAMANHO DA LISTA DE CANDIDATOS ANALISADOS	77
5.3.5. SENSIBILIDADE AO VALOR DO INDICADOR DA LISTA TABU DE EXPANSÃO	78
5.3.6. SENSIBILIDADE AO TAMANHO DO VETOR DE FREQUÊNCIA DA EXPANSÃO	79
5.3.7. SENSIBILIDADE À PORCENTAGEM DE INCREMENTO OSCILATÓRIO	80
5.3.8. SENSIBILIDADE AO NÚMERO MÁXIMO DE TROÇAS PERMITIDAS	80
5.3.9. SENSIBILIDADE AO NÚMERO DE CONFIGURAÇÕES DE DIVERSIFICAÇÃO	81
5.3.10. SENSIBILIDADE AO TAMANHO DA LISTA TABU DE DIVERSIFICAÇÃO	82
5.3.11. SENSIBILIDADE AO NÚMERO DE CIRCUITOS PROIBIDOS PARA O PROCESSO DE DIVERSIFICAÇÃO	83
5.4. DETERMINAÇÃO PRÁTICA DE PARÂMETROS DE ENTRADA	84

5.5. CONCLUSÕES	86
6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	88
6.1. CONCLUSÕES	88
6.2. CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	89
6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	89
APÊNDICE A. OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA VIA BUSCA TABU	90
A.1. INTRODUÇÃO	90
A.2. BASES E NOMENCLATURA DA BUSCA TABU	90
A.3. UMA FORMA SIMPLIFICADA DE BUSCA TABU	92
A.4. UTILIZAÇÃO DE NÍVEIS DE ASPIRAÇÃO	97
A.5. RESTRIÇÕES TABU INTEGRADAS COM CRITÉRIOS DE NÍVEL DE ASPIRAÇÃO	99
A.6. A FUNÇÃO DE MOVIMENTOS DOMINANTES E DEFICIENTES	102
A.7. LISTA TABU E OSCILAÇÃO ESTRATÉGICA	103
A.8. FUNÇÕES DE MEMÓRIA DE MÉDIO E LONGO PRAZO	104
APÊNDICE B. ÍNDICES DE SENSIBILIDADE PARA O ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO	107
APÊNDICE C. DADOS DOS SISTEMAS TESTE UTILIZADOS	114
C1. DADOS PARA O SISTEMA SUL (SU46)	114

C2. DADOS PARA O SISTEMA SUDESTE (SE79)

118

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

126

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Decomposição do Problema	13
Figura 2.2. A Não-Convexidade e a Decomposição Hierárquica	14
Figura 2.3 Estratégias de busca para o algoritmo híbrido.	22
Figura 4.1. Decomposição do Problema	32
Figura 4.2 Processo de busca	33
Figura 4.3 Processo de Expansão	36
Figura 4.4 Sistema Exemplo de 6 barras	37
Figura 4.5 Processo de expansão	45
Figura 4.6 Procedimento de busca de diferentes configurações de expansão	47
Figura 4.7 Processo de expansão inicial	48
Figura 4.8 Processo de intensificação	51
Figura 4.9 Procedimento de intensificação I	52
Figura 4.10 Procedimento de intensificação II	55
Figura 4.11 Processo de diversificação	58
Figura 4.12 Resultado final do caso teste para 4 processos de diversificação	62
Figura 4.13 Solução para o caso teste	62
Figura 4.14 Fluxograma do Algoritmo de Busca Tabu Aplicada ao Planejamento da Expansão da Transmissão	64
Figura 5.1 Sistema Sul Reduzido-SU46	69
Figura 5.2 Sistema Sudeste-SE79	70
Figura 5.3 Processo de diversificação para o caso SU46	73
Figura 5.4 Processo de busca para a primeira configuração do caso SU46	73
Figura 5.5 Processo de diversificação para o caso SE79	74
Figura 5.6 Processo de busca para a primeira configuração do caso SE79	75
Figura 5.7 Sensibilidade ao tipo de rede conexa inicial	75
Figura 5.8 Sensibilidade ao tipo de expansão utilizado	76
Figura 5.9 Sensibilidade ao tamanho da lista de candidatos analisados	77

Figura 5.10 Sensibilidade ao indicador da lista tabu de expansão	78
Figura 5.11 Sensibilidade ao tamanho do vetor de frequência da expansão	79
Figura 5.12 Sensibilidade ao porcentagem de incremento oscilatório	80
Figura 5.13 Sensibilidade ao número máximo de trocas permitidas	81
Figura 5.14 Sensibilidade ao número de configurações de diversificação	81
Figura 5.15 Sensibilidade ao tamanho da lista tabu de diversificação	83
Figura 5.16 Sensibilidade ao número de circuitos proibidos para diversificação	83
Figura A.1 Vértices do cubo unitário tridimensional	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Dados de Barras	37
Tabela 4.2 Dados dos Circuitos Candidatos	37
Tabela 4.3 Designação de pesos baseado no fator de sensibilidade	40
Tabela 4.4 Designação de pesos baseada no custo dos circuitos candidatos	41
Tabela 4.5 Designação de pesos baseado na susceptância dos circuitos candidatos	42
Tabela 4.6 Designação de pesos baseado no fluxo através dos circuitos candidatos	42
Tabela 4.7 Escolha do próximo circuito a ser incluído na rede	43
Tabela 4.8 Escolha de um circuito paralelo como próxima adição	45
Tabela 4.9 Procedimento de expansão P1 no exemplo de 6 barras	49
Tabela 4.10 Processo de expansão P2 no exemplo de 6 barras	49
Tabela 4.11 Cálculo do vetor de frequência e expansão inicial	50
Tabela 4.12 Procedimento de intensificação I (Fase 1) para o exemplo de 6 barras	53
Tabela 4.13 Processo de intensificação I (Fase 2) para o exemplo de 6 barras	54
Tabela 4.14 Processo de intensificação II (Fase 1) para o exemplo de 6 barras	57
Tabela 4.15 Cálculo do vetor de frequência da diversificação	60
Tabela 4.16 Processo de diversificação	61
Tabela 5.1 Resultados para o caso SU46	72
Tabela 5.2 Resultados para o caso SE79	74

NOMENCLATURA

c_{ij}	-	Custo incremental associado à adição de um circuito no ramo $i-j$;
x_{ij}	-	Valor total da susceptância adicionada do ramo $i-j$;
α	-	Parâmetro de penalidade associado com o corte de carga devido aos gargalos na capacidade da transmissão;
r	-	Vetor do corte de carga das barras;
S	-	Matriz de incidência dos ramos;
f	-	Vetor de fluxos de potência ativa dos ramos;
g	-	Vetor de injeções de potência ativa das barras;
d	-	Vetor de demanda das barras;
f_{ij}	-	Fluxo através do ramo $i-j$;
\bar{f}_{ij}	-	Fluxo máximo permitido do ramo $i-j$;
γ_{ij}^0	-	Susceptância inicial do ramo $i-j$;
$\bar{\phi}_{ij}$	-	Diferencia angular máxima, definido como a relação: $\bar{\phi}_{ij} = \bar{f}_{ij} / \gamma_{ij}$;
\bar{g}	-	Vetor de capacidades de geração máximas das barras;
n_{ij}	-	Número de novos circuitos associados ao ramo $i-j$;
$\tilde{\gamma}_{ij}$	-	Susceptância do novo circuito associado ao ramo $i-j$;
\bar{n}_{ij}	-	Número máximo de novos circuitos permitidos associados ao ramo $i-j$;
Ω	-	Representa o conjunto de todos os ramos onde a adição de novos circuitos é permitida;
θ_i, θ_j	-	Ângulos de tensão das barras terminais do ramo $i-j$;
Ω_1	-	Representa o conjunto de elementos de Ω , cujos ramos possuem circuitos da rede inicial;
θ	-	Vetor de ângulos de tensão das barras;
$\bar{\psi}$	-	Vetor de desviação angular máxima dos ramos, dado por $\bar{\psi}_{ij} = \bar{f}_{ij} / \gamma_{ij}$;
Nb	-	Número de barras da rede;

- π_i^0 - Variável dual ou multiplicador de Lagrange da barra i associado à restrição de balanço de potência do subproblema de *operação*;
- i - i -ésimo elemento de um conjunto;
- j - j -ésimo elemento de um conjunto;
- k - k -ésimo elemento de um conjunto;
- l - l -ésimo elemento de um conjunto;
- C - Número de configurações de expansão desejado;
- N - Tamanho da lista de candidatos analisados para escolher o próximo movimento de adição;
- J - Valor do indicador da lista tabu de expansão;
- M - Número de circuitos candidatos de maior frequência que serão utilizados no processo de expansão inicial;
- P - Porcentagem de incremento oscilatório;
- T - Número máximo de trocas permitidas;
- D - Número de processos de diversificação que serão executados;
- K - Número de configurações que um circuito candidato fica como movimento proibido;
- L - Número de circuitos proibidos para cada busca no processo de diversificação.

ABREVIATURAS

LCK	-	Lei de Correntes de Kirchoff;
LTK	-	Lei de Tensões de Kirchoff;
DC	-	Direct Current;
AC	-	Alternating Current;
SA	-	Recozimento Simulado;
GA	-	Algoritmos Genéticos;
GRASP	-	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure;
BT	-	Busca Tabu;
CA	-	Adição de Circuito;
LC	-	Lista de Candidatos;
CR	-	Remoção de Circuito;
LT	-	Lista Tabu;
SU46	-	Sistema Sul Brasileiro Reduzido;
SE79	-	Sistema Sudeste Brasileiro;
u.m.	-	Unidades Monetárias.

RESUMO

O planejamento de longo prazo de sistemas de energia elétrica tem como principal produto o fornecimento de informações concernentes às projeções de demanda, aos projetos de geração mais atrativos, e conseqüentemente, da futura rede de transmissão.

O contexto atual do setor elétrico mundial exige um processo de planejamento de longo prazo multidisciplinar envolvendo uma infinidade de agentes, o que aumenta a complexidade do problema, principalmente face as incertezas presentes. Isto motiva o desenvolvimento de metodologias mais ágeis para a solução do problema, de modo a permitir que o planejador use o seu tempo de forma mais criativa possível, permitindo-lhe utilizar a maior parte do seu tempo na análise e não no processamento.

Nesse contexto, aparece um novo desafio que consiste no desenvolvimento de novas metodologias capazes de considerar múltiplos cenários de geração e de mercado, utilizando ferramentas computacionais adequadas, de fácil manejo, confiáveis e de resposta rápida, capazes de indicar aos agentes do mercado quais as opções de expansão da transmissão bem como as melhores oportunidades para conexão desses agentes ao sistema de transmissão.

Este trabalho, centra-se no desenvolvimento de uma metodologia para o planejamento da expansão da transmissão de longo prazo, que visa a determinação do plano de expansão da transmissão de mínimo custo para um ano futuro especificado.

A metodologia desenvolvida utiliza um algoritmo baseado em heurística denominado *Busca Tabu (BT)*, o qual é particularmente interessante para solucionar problemas de otimização combinatorial. *BT* é um procedimento adaptativo baseado no conceito de memória flexível com a habilidade para superar as limitações de otimalidade local, inerentes na formulação do problema de planejamento da expansão da transmissão, dada a não convexidade do mesmo.

A metodologia proposta é validada com uma aplicação ao sistema Sul-Sudeste brasileiro, obtendo-se resultados satisfatórios e com baixo custo computacional.

ABSTRACT

Long term transmission expansion planning problem has as principal product to provide information about load forecasting, more attractive generation projects, and consequently, the future transmission network.

The electric sector worldwide, currently demands a long term planning process which involves a lot of different agents, increasing the complexity of problems, specially due to the presence of more uncertainties.

In this context, a new challenge appears, which consists in developing new methodologies capable to consider several scenarios of generation and market using adequate computational tools, easy handling, realibilities and fast answering, able to indicate to market agents appropriate expansion transmission alternatives, as well as more convenient connection alternatives of this agents to the transmission system.

This work addresses the development of a methodology to solve the long term transmission network expansion planning problem which consists in minimizing the investment cost in new transmission facilities subject to operational constraints for a future year.

The developed methodology uses an algorithm based on heuristic called *Tabu Search (TS)*, which is particularly interesting to solve combinatorial optimization problems. Briefly, *TS* consists of a global iterative search procedure that moves from one solution to another in order to seek improvements over all solutions previously visited. The basic concepts of *TS* are movements and memory. Movements consists in operations to change one solution to another while memory is used with different objectives, e.g. to guide the search, to avoid cycles, and to overcome local optimum solutions related to the formulation of transmission expansion planning problem, caused by his non-convexity.

This proposed methodology is tested by an application to Brazilian Southeastern system, obtaining satisfactory results with low computational effort.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O planejamento de expansão do sistema é uma atividade fundamental associada à gestão dos sistemas de energia elétrica, cujo principal objetivo é o fornecimento de informações concernentes às projeções de demanda, aos projetos de geração mais atrativos e, conseqüentemente, da futura rede de transmissão. No caso da transmissão, o planejamento visa determinar uma rede que permita transportar a energia produzida até os centros de carga, atendendo a requisitos técnicos e de qualidade do serviço e de modo a minimizar os custos de expansão e operação do sistema.

O contexto atual do setor elétrico mundial exige um processo de planejamento de longo prazo, multidisciplinar, envolvendo uma infinidade de agentes, o que aumenta a complexidade do problema, principalmente face às incertezas presentes.

Tal quadro determina a necessidade de modelos mais ágeis para a solução do problema, de modo a permitir que o planejador use a maior parte do seu tempo na análise e não no processamento.

Neste contexto, tem-se um novo desafio, onde é requerido o desenvolvimento de novas metodologias capazes de considerar múltiplos cenários de geração e de mercado, utilizando ferramentas computacionais adequadas, de fácil manejo, confiáveis e de resposta rápida, que permitam indicar aos agentes do mercado quais as opções de expansão da transmissão, bem como as melhores oportunidades para conexão desses agentes ao sistema de transmissão.

Assim, este trabalho, objetiva desenvolver uma metodologia prática, útil, rápida e confiável para o planejamento da expansão da transmissão de longo prazo. Este problema tem como principal dificuldade o fato ser combinatorial e de grande escala, de modo que o número de possibilidades de configurações de transmissão a serem analisadas cresce exponencialmente com o tamanho da rede.

O problema do planejamento da expansão da transmissão pode ser classificado como estático ou dinâmico [1,2], sendo objetivo deste trabalho resolver o problema estático. Este tipo de problema envolve a expansão do sistema para um único estágio do tempo, isto é, deseja-se determinar o plano de expansão da transmissão de mínimo custo para um ano futuro especificado.

O problema de planejamento estático é formulado como um problema de programação matemática que, dependendo da modelagem de rede utilizada, faz uso de um modelo de transporte ou de um modelo de fluxo de potência linearizado. A função objetivo deste problema consiste na minimização do custo de investimento da expansão da rede mais o custo de operação [1].

As restrições associadas ao problema variam segundo o modelo de rede utilizado. Estas representam as restrições operativas, tais como Lei de Correntes de Kirchhoff (LCK), Lei de Tensões de Kirchhoff (LTK), limites de fluxos máximos pelos circuitos e limites de geração.

A solução deste problema tem sido amplamente estudada por diversos pesquisadores, sendo conhecidos trabalhos concernentes à matéria desde 1970 [3]. Até 1989 foram desenvolvidas metodologias que utilizam basicamente modelos de programação linear com apoio de métodos de decomposição. As soluções encontradas por esses modelos eram consideradas até então como mínimos globais.

Em 1994 Romero et alli [1] desenvolveram um método de decomposição hierárquica, capaz de superar a maior dificuldade na solução deste problema: a não convexidade da região de soluções viáveis, pela qual somente é possível garantir a convergência para soluções ótimas locais. Essa metodologia utiliza um esquema de decomposição dividido em três fases, as quais permitem conseguir soluções melhores que as obtidas até então por outros métodos.

Não obstante a utilidade das metodologias que se baseiam exclusivamente em programação matemática, o elevado montante de capital dispendido na expansão do sistema tem motivado o desenvolvimento de algoritmos baseados em heurísticas, com a finalidade de se obter o ótimo global com tempos de processamento aceitáveis.

Tais algoritmos procuram reduzir a probabilidade de se encontrar uma solução ótima local devido à natureza não convexa do problema. Adicionalmente, os algoritmos não convencionais procuram reduzir o tempo de processamento, comparativamente aos de programação linear inteira-mista que utilizam, de uma forma geral, o método de "branch and bound".

O uso de métodos *heurísticos* tem demonstrado ser possível a obtenção eficiente de boas soluções ótimas locais, mas não necessariamente globais. Tal dificuldade decorre do fato que o uso de heurística não permite demonstrar matematicamente a convergência para o ótimo global quando são utilizados supostos reais, tais como núme-

ro finito de iterações, população de mostra finita, etc. Algumas aplicações recentes utilizando técnicas não convencionais consistem do uso de Sistemas Especialistas [4], Reconhecimento Simulado (SA) [5], Algoritmos Genéticos (GA) [6], *GRASP* [7], e Busca Tabu (BT) [6,8].

Neste trabalho, utiliza-se um algoritmo baseado em *BT* para resolver o problema de planejamento da expansão de transmissão. A *Busca Tabu* é uma estratégia proposta para solucionar problemas de otimização combinatorial, utilizada numa ampla gama de aplicações, particularmente em problemas de programação inteira e inteira-mista.

BT é um procedimento adaptativo capaz de superar as limitações de otimalidade local podendo utilizar muitos outros métodos tais como algoritmos de programação linear e heurísticas especializadas. Teve suas origens em 1970, quando foi utilizada em procedimentos combinatoriais aplicados a problemas não-lineares, e subseqüentemente aplicada a uma diversa coleção de problemas com os quais se têm conseguido impressionante sucesso prático. O uso de *BT* torna possível obter soluções de qualidade superior em relação àquelas obtidas previamente com estratégias concorrentes, e geralmente com menor esforço computacional [5,6].

O presente trabalho tem como objetivos orientar o leitor no entendimento da metodologia de *BT*, e sua aplicação específica ao problema da expansão da transmissão de longo prazo.

Assim, no Capítulo 2, é apresentada uma descrição conceitual do problema, bem como sua formulação e uma revisão bibliográfica das diversas metodologias para sua resolução.

No Capítulo 3, são tratados os conceitos da *BT* aplicados ao problema do planejamento da expansão da transmissão, explicando-se detalhadamente cada procedimento que constitui o processo de busca da solução do problema.

No Capítulo 4, é analisado o comportamento do modelo computacional desenvolvido, com base nos processos de busca definidos no Capítulo 3, aplicado a dois sistemas teste de grande porte.

Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e contribuições deste trabalho, bem como as sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

2.1. INTRODUÇÃO

O planejamento indicativo de sistemas de energia elétrica tem como objetivo principal fornecer aos agentes do sistema indicadores acerca de possíveis mudanças topológicas de transmissão e dos requisitos de geração para atendimento do mercado. Esses indicadores consistem basicamente das projeções de demanda, dos projetos de geração mais atrativos e consequentemente da futura rede de transmissão que possibilitará o transporte da energia produzida para os centros de consumo, obedecendo a requisitos de confiabilidade e qualidade e ao menor custo possível.

A principal dificuldade para fornecer indicadores de mudanças topológicas na rede, deve-se no fato de que o planejamento da expansão da transmissão é um problema combinatorial de grande escala, no qual o número de possibilidades de configurações de transmissão a serem analisadas cresce exponencialmente com a estrutura e complexidade da rede.

Neste capítulo é apresentada a descrição conceitual do problema de planejamento da expansão da transmissão, bem como sua formulação e uma revisão bibliográfica acerca das diversas propostas utilizadas para a resolução do problema.

2.2. CONCEITUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

O propósito básico do planejamento da expansão da transmissão de longo prazo é determinar quando e onde instalar novos circuitos, de modo que o sistema planejado atenda a um conjunto de critérios de confiabilidade e que os custos associados sejam economicamente viáveis.

Dependendo de como seja solucionado, o problema do planejamento da expansão da transmissão pode ser classificado como estático ou dinâmico [1,2]. O problema estático envolve transições num único estágio de tempo, isto é, deseja-se determinar o plano de expansão da transmissão de mínimo custo para um ano no futuro, a partir das seguintes informações:

- ♦ configuração da rede atual;
- ♦ limites operativos da rede;
- ♦ dados técnicos e de investimento dos circuitos candidatos;
- ♦ despacho futuro de geração/demanda.

O problema dinâmico consiste em encontrar o plano de expansão de mínimo custo, para todos os anos, dentro do horizonte de tempo considerado. Neste trabalho a metodologia proposta é aplicada ao problema estático.

2.3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O planejamento estático da transmissão de longo prazo é formulado como um problema de programação matemática que, dependendo da modelagem de rede utilizada, toma a forma de um destes três modelos clássicos: modelo de transporte, modelo de fluxo de potência linearizado e modelo de fluxo de potência não linear ou convencional.

A função objetivo é a mesma para os três modelos, e consiste na minimização do custo de investimento da expansão da rede mais o custo de operação. O custo de operação é representado pelo corte de carga multiplicado por um fator de penalidade.

As restrições associadas ao problema variam segundo o modelo de rede utilizado, e são compostas por um conjunto de equações que representam as restrições operativas, tais como Lei de Correntes de Kirchoff (LCK), Lei de Tensões de Kirchoff (LTK), limites de fluxos máximos pelos circuitos e limites de geração. A seguir são apresentados os modelos clássicos:

2.3.1. MODELO DE TRANSPORTE

Para este modelo, as restrições associadas são, basicamente, o balanço de potência em cada nó, as capacidades dos ramos para transportar potência elétrica, e os limites de geração. Esta formulação é baseada nos denominados modelos de transporte e é apresentada a seguir [1]:

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} x_{ij} + \sum_i \alpha_i r_i \quad (2.1)$$

Sujeito a

$$Sf + g + r = d \quad (2.2)$$

$$|f_{ij}| - x_{ij} \bar{\phi}_{ij} \leq \gamma_{ij}^0 \bar{\phi}_{ij} \quad (2.3)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g}, \quad 0 \leq r \leq d \quad (2.4)$$

$$x_{ij} = n_{ij} \tilde{\gamma}_{ij}; \quad 0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij}; \quad \forall (i, j) \in \Omega \quad (2.5)$$

Onde:

- c_{ij} custo incremental associado à adição de um circuito no ramo $i-j$ (\$);
- x_{ij} valor total da susceptância adicionada do ramo $i-j$;
- α parâmetro de penalidade associado com o corte de carga devido aos gargalos na capacidade da transmissão (\$/MW);
- r vetor do corte de carga das barras (MW);
- S matriz de incidência dos ramos;
- f vetor de fluxos de potência ativa dos ramos (MW);
- g vetor de injeções de potência ativa das barras (MW);
- d vetor de demanda das barras (MW);
- f_{ij} fluxo através do ramo $i-j$ (MW);
- \bar{f}_{ij} fluxo máximo permitido do ramo $i-j$ (MW);
- γ_{ij}^0 susceptância inicial do ramo $i-j$;
- $\bar{\phi}_{ij}$ diferença angular máxima, definido como a relação: $\bar{\phi}_{ij} = \bar{f}_{ij} / \gamma_{ij}$;
- \bar{g} vetor de capacidades de geração máximas das barras (MW);
- n_{ij} número de novos circuitos associados ao ramo $i-j$;
- $\tilde{\gamma}_{ij}$ susceptância do novo circuito associado ao ramo $i-j$;
- \bar{n}_{ij} número máximo de novos circuitos permitidos associados ao ramo $i-j$;
- Ω representa o conjunto de todos os ramos onde a adição de novos circuitos é permitida.

Nesta formulação, a função objetivo (2.1) representa os custos de investimento e operação, a Eq.(2.2) denota a LCK para o modelo de fluxo de potência DC, a restrição (2.3) determina que o fluxo de potência ativa f_{ij} está limitado pela capacidade do ramo existente mais as capacidades das novas adições. A restrição (2.4) expressa os limites de geração da potência ativa g e do corte de carga r , e as restrições (2.5) consi-

deram a natureza discreta das variáveis de decisão x_{ij} . Esta formulação é um problema de programação linear do tipo inteiro-misto.

2.3.2. MODELO DE FLUXO DE POTÊNCIA LINEARIZADO

Este modelo é mais ajustado à realidade que o de transporte, já que no modelo anterior não são consideradas as susceptâncias dos circuitos. Neste modelo são adicionadas ao problema as restrições operacionais devidas à LTK, e é representado da seguinte maneira [1]:

$$\text{Minimizar } \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} x_{ij} + \sum_i \alpha_i r_i \quad (2.6)$$

Sujeito a

$$Sf + g + r = d \quad (2.7)$$

$$f_{ij} - (\gamma_{ij}^0 + x_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (2.8)$$

$$|f_{ij}| - x_{ij} \bar{\phi}_{ij} \leq \gamma_{ij}^0 \bar{\phi}_{ij} \quad (2.9)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g}; \quad 0 \leq r \leq d \quad (2.10)$$

$$x_{ij} = n_{ij} \tilde{\gamma}_{ij}; \quad 0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij}; \quad \forall (i,j) \in \Omega \quad (2.11)$$

Onde:

c_{ij}	custo incremental associado à adição de um circuito no ramo $i-j$ (\$);
x_{ij}	valor total da susceptância adicionada do ramo $i-j$;
α	parâmetro de penalidade associado com o corte de carga devido aos gargalos na capacidade da transmissão (\$/MW);
r	vetor do corte de carga das barras (MW);
S	matriz de incidência dos ramos;
f	vetor de fluxos de potência ativa dos ramos (MW);
g	vetor de injeções de potência ativa das barras (MW);
d	vetor de demanda das barras (MW);
f_{ij}	fluxo através do ramo $i-j$ (MW);
\bar{f}_{ij}	fluxo máximo permitido do ramo $i-j$ (MW);
γ_{ij}^0	susceptância inicial do ramo $i-j$;
θ_i, θ_j	ângulos de tensão das barras terminais do ramo $i-j$;

$\bar{\phi}_{ij}$	diferença angular máxima, definido como a relação: $\bar{\phi}_{ij} = \bar{f}_{ij} / \gamma_{ij}$;
\bar{g}	vetor de capacidades de geração máximas das barras (MW);
n_{ij}	número de novos circuitos associados ao ramo $i-j$;
$\tilde{\gamma}_{ij}$	susceptância do novo circuito associado ao ramo $i-j$;
\bar{n}_{ij}	número máximo de novos circuitos permitidos associados ao ramo $i-j$;
Ω	representa o conjunto de todos os ramos onde a adição de novos circuitos é permitida.

Como foi descrito anteriormente, a diferença com o modelo de transporte está na adição da Eq. (2.8) que introduz o conjunto de restrições representando a LTK. O problema torna-se agora de programação *não-linear* inteiro-misto, já que a variável de decisão x_{ij} aparece multiplicada pelas variáveis de estado θ_i, θ_j . Para problemas com estas características, não é possível garantir a condição de convexidade do problema, podendo apresentar ótimos locais.

2.3.3. MODELO DE FLUXO DE POTÊNCIA NÃO-LINEAR

Este modelo considera um maior conjunto de restrições que os modelos anteriores, tais como limites de potência reativa, limites de tensão nas barras, posições de tap de transformadores, e utiliza o modelo de fluxo de potência não-linear em vez do modelo linearizado, o que torna o problema ainda mais complexo, já que o modelo com fluxo de potência não-linear também é não convexo.

Entretanto, para estudos de expansão da transmissão de longo prazo, os ganhos de qualidade obtidos com uma formulação com este nível de sofisticação não compensam o esforço computacional requerido para calculá-la.

2.4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir, é apresentada uma revisão bibliográfica das metodologias para resolver o problema da expansão da transmissão de longo prazo, destacando o problema da não convexidade, e os avanços obtidos na matéria nos últimos anos.

2.4.1. SOLUÇÃO DO PROBLEMA

Por muito tempo, ferramentas disponíveis para solucionar o problema do planejamento da expansão de longo prazo foram analíticas, tais como fluxo de potência.

Nesse procedimento o planejador precisava de muita experiência e bom senso para determinar as diferentes possibilidades de expansão da rede, que pudessem satisfazer os requerimentos operacionais futuros ao menor custo possível.

Uma das primeiras metodologias que tentaram solucionar o problema de síntese de redes foi desenvolvida em 1970 por Garver [3]; que formulou o problema como um fluxo de potência DC e utiliza um algoritmo de programação linear para encontrar as rotas mais diretas desde a geração até as cargas. Este método considera que todos os circuitos da rede possam transportar toda a potência produzida até as cargas. Por tanto, é sugerida a penalização daqueles ramos sem circuitos iniciais para estimular o fluxo através da rede existente. As adições de circuitos são feitas no circuito com maior sobrecarga e é calculado um novo fluxo de potência linear.

Na década de 1970 foram propostas diferentes metodologias que utilizavam programação linear ou programação dinâmica, mas sem conseguir avanços significativos na solução do problema [9,10,11].

Em 1979, Monticelli et alii [12] propuseram a utilização de ferramentas interativas para planejamento da transmissão. Para ordenar as adições possíveis, este método utiliza um análise de sensibilidade com respeito às susceptâncias dos circuitos de um índice de "mínimo esforço", o qual é o resultado de um problema de otimização utilizado para resolver um fluxo de potência DC.

A utilização de esquemas de decomposição matemática para este problema foi iniciado com a metodologia de Pereira et alii [13]. Nesse trabalho, os autores usam decomposição de Benders para dividir o problema global em dois subproblemas: o de investimento que escolhe um plano de expansão de prova; e o de operação que analisa as decisões de investimento de prova e expressa as restrições operacionais em termos de restrições lineares ou *Cortes de Benders*, as quais são adicionadas ao subproblema de investimento. Este procedimento é realizado iterativamente até obter-se a convergência.

Em 1989, Pinto et alii [14] propuseram um esquema de decomposição de Benders combinado com um algoritmo de enumeração implícita. Para reduzir esforço computacional, são propostas duas técnicas denominadas *redução de inviabilidade elétrica* e *redução de custos*.

Deve-se destacar que as metodologias mencionadas anteriormente não reconhecem a não-convexidade inerente do problema, de modo que o uso de cortes de Benders lineares podem cortar a região viável, excluindo a solução ótima. Para evitar

este problema, em 1994, Romero et alii [1] propuseram a utilização do método de decomposição hierárquica composto por três fases. A primeira soluciona um problema convexo relacionado ao planejamento da transmissão mediante a decomposição de Benders, considerando somente o modelo de transporte. Na segunda fase, o modelo de rede é substituído por um modelo híbrido, que utiliza um modelo DC para ramos existentes e um modelo de transporte para ramos novos. Finalmente, na última fase, o modelo DC é aplicado para todos os ramos do subproblema de operação e soluciona o subproblema de investimento mediante um algoritmo de cálculo convencional.

Na linha do planejamento de expansão dinâmica, tem-se o trabalho de Oliveira et alii [2] onde é usado um procedimento heurístico chamado *backward-forward*. Esta metodologia tenta encontrar o conjunto das melhores rotas combinando as soluções obtidas para todos os anos desde o primeiro até o último. A solução para cada ano é baseada na análise de sensibilidade do problema de mínimo corte de carga.

Em 1995, Oliveira et alii [15] propuseram um esquema similar de decomposição hierárquica, composto de duas fases. Na primeira é considerado somente um modelo de transporte, mas sem relaxar a integridade das variáveis de investimento enquanto para a segunda fase é aplicado um procedimento semelhante ao da última fase utilizada por Romero [1]. Contudo, a principal diferença entre as duas metodologias hierárquicas está na maneira de solucionar o subproblema de investimento para cada iteração de Benders. Na metodologia de Romero, o subproblema de investimento é solucionado até a otimalidade, mediante um algoritmo de cálculo convencional. Nesta metodologia, é utilizado um algoritmo heurístico orientado para alcançar somente soluções viáveis, com a finalidade de reduzir o esforço computacional de solucionar uma sucessão de difíceis subproblemas combinatoriais de investimento.

Nos últimos anos, foram adaptados algoritmos heurísticos ao problema de planejamento da transmissão, com a finalidade de obter boas soluções, evitando mínimos locais.

2.4.2. ALGORITMOS CONVENCIONAIS

A seguir, são apresentados alguns algoritmos mencionados anteriormente, expondo-se as vantagens e desvantagens destes métodos para a solução do problema de planejamento da transmissão. Entende-se como algoritmos convencionais aqueles basea-

dos somente em métodos de programação matemática. A análise se restringe às proposições que representam os marcos significativos para a solução do problema.

2.4.2.1. Estimativa da Rede de Transmissão Utilizando Programação Linear [3]

Esta metodologia foi a primeira tentativa de solução do problema. A finalidade do método é desenvolver uma rede de transmissão que possa cumprir com as necessidades de futuros geradores e condições de carregamento. Para encontrar o plano de expansão utiliza-se um método de estimação de rede que supõe conhecidos todos os dados relevantes de geração e carga para o ano do horizonte.

O método de estimação de rede consiste dos seguintes passos:

- i) formula as equações de fluxo de potência como um problema de minimização;
- ii) utiliza programação linear para solucionar o problema da minimização dos fluxos de potência necessários. Este resultado é chamado um fluxo linear estimado;
- iii) seleciona a adição de um circuito baseado na localização da maior sobrecarga estimada;
- iv) repete os passos de estimação de fluxo e seleção de circuito até que o sistema não apresente sobrecargas.

Ressalte-se que nessa formulação os reforços candidatos são introduzidos, originando novas rotas de transmissão. Assim, pode-se avaliar aquelas de maior carregamento, permitindo identificar os circuitos mais atrativos.

Vantagens:

- facilidade de Programação;
- não requer esforço computacional considerável;
- pode obter soluções ótimas locais úteis para inicializar a rede em outros algoritmos de solução.

Desvantagens:

- as regras de seleção de circuitos podem levar facilmente a um mínimo local, para sistemas de médio e grande porte.

2.4.2.2. Método de Decomposição Hierárquica para o Planejamento da Expansão da Transmissão [1]

Como foi mencionado anteriormente, a maior dificuldade para obter soluções da expansão da transmissão ótimas globais para sistemas reais, está associada à não convexidade do problema, pela qual são garantidas somente soluções ótimas locais.

Esta constatação faz com que o uso do método de decomposição de Benders, que é o ponto de partida desta metodologia, não garanta a otimalidade global da solução. Para contornar esta situação, os autores propõem a decomposição hierárquica que mostrou ser bastante eficiente em comparação com os outros métodos desenvolvidos até seu surgimento. Esta metodologia utiliza três níveis diferentes de modelagem da rede: Modelo de Transporte, Modelo Híbrido, e Modelo de Fluxo de Potência Linearizado ou Modelo DC.

Cada nível de representação da rede é visto como uma relaxação do próximo nível superior. Uma solução inicial é obtida para o modelo mais simples, ou seja o modelo de transporte e, na medida em que se vai avançando até a solução final, modelos mais precisos são utilizados.

Nos primeiros estágios do planejamento da expansão o algoritmo hierárquico soluciona problemas relaxados para os quais são satisfeitas condições de convexidade e podem ser obtidas soluções ótimas. As restrições dos problemas relaxados são gradualmente reintroduzidas até ficarem perto da solução final para o problema completo.

Assim, inicialmente é solucionado um problema relaxado, com apoio do modelo de transporte. A solução ótima obtida junto com outras informações relevantes são armazenadas para serem utilizadas no processo de solução do segundo nível hierárquico, chamado de modelo híbrido, no qual os ramos com circuitos existentes são tratados via modelo DC, enquanto os ramos com possibilidades de novas adições são tratados mediante o modelo de transporte. Finalmente, são colocadas dentro do problema todas as restrições, junto com o modelo DC para a rede completa.

A representação do modelo híbrido é a seguinte:

$$\text{Minimizar } \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} x_{ij} + \sum_i \alpha_i r_i \quad (2.12)$$

Sujeito a

$$Sf + g + r = d \quad (2.13)$$

$$f_{ij} - (\gamma_{ij}^0 + x_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0; \quad \forall (i, j) \in \Omega_1 \quad (2.14)$$

$$|f_{ij}| - x_{ij} \bar{\phi}_{ij} \leq \gamma_{ij}^0 \bar{\phi}_{ij} \quad (2.15)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g}; \quad 0 \leq r \leq d \quad (2.16)$$

$$x_{ij} = n_{ij} \tilde{\gamma}_{ij}; \quad 0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij}; \quad \forall (i, j) \in \Omega \quad (2.17)$$

Onde:

- Ω representa o conjunto de todos os ramos onde a adição de novos circuitos é permitido;
- Ω_1 representa o conjunto de elementos de Ω , cujos ramos possuem circuitos da rede inicial.

As outras variáveis foram descritas nos numerais 2.3.1 e 2.3.2

A cada nível do algoritmo hierárquico o problema de expansão é novamente decomposto mediante o método de Benders [16,17] em dois subproblemas: O subproblema de investimento e o subproblema de operação, Figura 2.1:

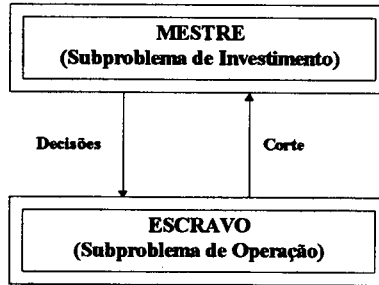


Figura 2.1. Decomposição do Problema

Durante o processo de solução estes dois subproblemas intercambiam informação: o *Mestre* informa ao *Escravo* sobre as decisões de investimento, ou seja, adições de capacidade de transmissão, e o *Escravo* informa ao *Mestre* sobre necessidades de transmissão através de restrições lineares adicionais, denominadas cortes de Benders.

O subproblema de investimento basicamente modela o aspecto econômico do processo de planejamento; o subproblema de operação representa as equações de fluxo de potência, com diferentes graus de detalhamento, de acordo com o nível hierárquico atual. O subproblema de operação usa um plano de investimentos gerado pelo subproblema de investimento e minimiza a utilização de gerações fictícias para suprir a carga sem violações nas restrições operativas.

Se em um dado estágio do processo de solução, as decisões de investimento encontram um ponto de operação viável, que não precisa de geração fictícia, o processo avança para o próximo nível hierárquico.

O maior obstáculo associado à aplicação prática da metodologia de Benders se origina na não-convexidade da região viável. Uma visualização deste tipo de situação está dada na Figura 2.2.a. A figura ilustra a minimização restrita de uma função linear, assumindo-se que a região viável não é explicitamente conhecida e, para tanto, precisa ser construída gradualmente mediante uma seqüência de hiperplanos ou cortes. Dado que os cortes restringem a busca a uma vizinhança, é possível obter uma solução ótima local.

A metodologia de decomposição hierárquica soluciona o problema em três fases como aparece na Figura 2.2.b. Primeiro utiliza a modelagem convexa com apoio do modelo de transporte, com a qual se consegue uma solução ótima. Em seguida é utilizado um modelo com restrições adicionais chamado modelo híbrido, e finalmente obtêm-se o ótimo global para o problema com apoio do modelo DC. Note-se que este último modelo é utilizado quando sua solução inicial está perto da solução ótima global, reduzindo o risco de se atingir um ótimo local.

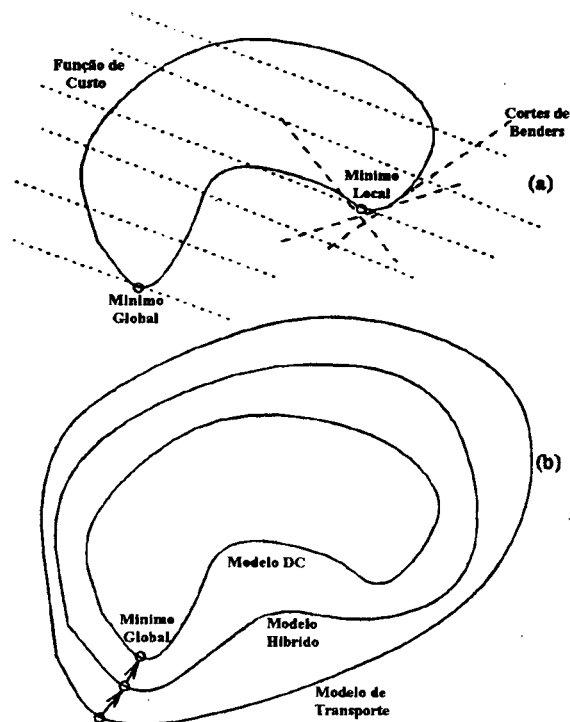


Figura 2.2. A Não-Convexidade e a Decomposição Hierárquica

Vantagens:

- O fato de dividir o problema em três fases possibilita encontrar uma solução ótima global reduzindo a probabilidade de obter soluções locais.

Desvantagens:

- A solução das três fases que compõem este método, precisam do cálculo de soluções de problemas de programação linear inteira-mista, o que geralmente requer um grande esforço computacional.

2.4.2.3. Planejamento da Expansão Multianual [2]

Nesta metodologia, são calculados os custos de investimento da expansão da rede de transmissão, ano após ano, para todo o horizonte de planejamento considerado. Os autores propõem uma metodologia *Backward/Forward* para encontrar o plano de expansão da transmissão.

O problema da expansão nesta metodologia, utiliza como representação da rede o modelo de fluxo de potência linearizado, que corresponde com o modelo das equações do numeral 2.3.2, visto anteriormente, e pode ser apresentado da seguinte maneira:

$$\text{Minimizar} \quad z = \sum_{i=1}^n r_i \quad (2.18)$$

Sujeito a

$$B\theta + g + r = d \quad (2.19)$$

$$g \leq \overline{g} \quad (2.20)$$

$$|S\theta| \leq \overline{\phi} \quad (2.21)$$

$$r \leq d \quad (2.22)$$

Onde:

- r vetor do corte de carga das barras;
- S matriz de incidência dos ramos;
- g vetor de injeções de potência ativa das barras;
- d vetor de demanda das barras;
- θ vetor de ângulos de tensão das barras;

\bar{f}_{ij}	fluxo máximo permitido do ramo $i-j$;
γ_{ij}	susceptância do ramo $i-j$;
$\bar{\phi}$	vetor de desviação angular máxima dos ramos, dado por $\bar{\phi}_{ij} = \bar{f}_{ij} / \gamma_{ij}$;
\bar{g}	vetor de capacidades de geração máximas das barras;

O problema representado pelas equações anteriores é solucionado mediante um algoritmo dual simplex. Os subprodutos desta solução são os multiplicadores de Lagrange associados às restrições. Em particular, denotando por π_{di} o multiplicador associado à i -ésima restrição (2.19), pode-se mostrar que:

$$\pi_{\gamma_{kl}} = \frac{\partial Z}{\partial \gamma_{kl}} = (\pi_{dk} - \pi_{dl})(\theta_l - \theta_k) \quad (2.23)$$

A demonstração desta expressão é apresentada no Apêndice B deste trabalho.

Esta sensibilidade expressa a redução no custo de operação devido a diminuição do corte de carga causado pelo reforço de capacidade marginal no ramo $k-l$, e pode ser calculado para qualquer ramo.

Para selecionar o novo circuito que será adicionado à rede, é utilizado um procedimento denominado adição de circuito (*CA*), o qual analisa cada um dos circuitos incluídos na lista de candidatos (*LC*) que apresentam os melhores fatores de sensibilidade. Esta análise é feita mediante a utilização de técnicas que simulam o benefício total de adicionar cada circuito da *LC*. Finalmente seleciona-se o circuito com a melhor relação custo-benefício descontando o custo das perdas. O procedimento *CA* repete-se até que todos os limites operativos sejam cumpridos, isto é, sem que apareçam sobrecargas na rede.

Depois de aplicar o procedimento *CA* pode acontecer que circuitos adicionados anteriormente sejam desnecessários e possam ser removidos. Para isto, os circuitos adicionados pelo procedimento *CA* são organizados em ordem decrescente de custo de investimento, e são utilizadas técnicas de compensação para verificar se podem ser removidos ou não, isto é, se a remoção do circuito não causa violações na rede. Este procedimento chamado remoção de circuito (*CR*) completa o algoritmo *CA/CR* que produz uma configuração de rede viável para cada ano.

Os autores apresentam o procedimento de expansão denominado *Backward* que consiste em começar o processo de solução a partir do último ano da ex-

pansão, mediante a aplicação dos processos *CA/CR*. Em seguida, para os anos anteriores ao último ano da expansão, é ajustada a lista de candidatos aplicando-se sequencialmente os procedimentos *CA/CR* em direção inversa no tempo, até solucionar o primeiro ano.

Finalmente é referenciado um procedimento de expansão denominado *Forward*, o qual é necessário para completar a metodologia que consiste da utilização sistemática dos procedimentos *Backward/Forward* para assim produzir planos de expansão da rede mais consistentes e econômicos.

O procedimento termina quando o custo de um novo plano de expansão, desde o primeiro ano até o último, não melhora com respeito ao plano anterior.

Vantagens:

- Esta metodologia permite obter a solução do plano de expansão para cada ano dentro do horizonte de estudo.

Desvantagens:

- Requer informação completa sobre despachos de geração e carga para cada ano dentro do horizonte de estudo, a qual pode representar grande quantidade de dados no caso de diferentes cenários energéticos.
- A convergência do método para o ótimo global não é garantida.

2.4.3. ALGORITMOS DE SOLUÇÃO NÃO-CONVENCIONAIS

Os algoritmos de solução não-convencionais foram desenvolvidos com a finalidade de enfrentar as duas limitações principais das metodologias convencionais. A primeira, associada à probabilidade de o algoritmo encontrar uma solução ótima local devido à natureza não-convexa do problema e, a segunda, devida aos elevados tempos computacionais necessários para solucionar os problemas de programação linear inteira-mista, utilizados nestas metodologias.

Neste trabalho define-se algoritmo não-convencional como aquele que utiliza em associação com os modelos baseados em programação matemática, modelos baseados em heurísticas.

Os métodos heurísticos têm demonstrado que conseguem encontrar eficientemente boas soluções ótimas locais, mas não necessariamente globais. Algumas aplicações recentes utilizando técnicas não-convencionais são Sistemas Especialistas [4],

Recozimento Simulado (*SA*) [5], Algoritmos Genéticos (*GA*) [6], *GRASP* [7], e Busca Tabu (*BT*) [6,8].

Na continuação são apresentados alguns dos métodos heurísticos mencionados anteriormente:

2.4.3.1. Planejamento da Expansão da Rede de Transmissão Utilizando Recozimento Simulado [5,6]

O recozimento simulado (*RS*) tenta evitar ótimos locais permitindo temporariamente deteriorações limitadas da solução atual. Neste sentido difere radicalmente dos algoritmos convencionais que sempre prosseguem mediante mudanças determinísticas que podem levar a ótimos locais. Assim, no método de *RS* as transições de estado que levam a incrementos atuais na função objetivo podem ser aceitas com uma certa probabilidade.

O *RS* emula o processo físico de esfriamento lento em sólidos, e tem sido originalmente proposto no domínio da mecânica estatística como maneira de modelar o processo natural de solidificação e formação de cristais. É sabido que cristais livres de imperfeições, isto é sólidos com mínima energia, são formados mais provavelmente sob um processo de esfriamento lento.

As duas características principais do processo de *RS* são: (1) o mecanismo de transição de estados; e (2) o esquema de esfriamento. Os parâmetros que definem estas duas características chave são determinados através de testes com problemas de pequeno e médio porte [18], para os quais são conhecidas soluções ótimas. Estes parâmetros são utilizados para solucionar problemas de grande porte sem solução ótima conhecida. A formulação do problema é a mesma apresentada no item 2.3.2.

O "Mecanismo Básico de Transição" faz com que a solução atual se movimente entre duas configurações sucessivas, da configuração G_k à configuração G_{k+1} . Isto é obtido mediante uma pequena modificação aleatória introduzida na configuração atual. Dada uma configuração G_k , a nova configuração G_{k+1} pode ser obtida da seguinte maneira:

- adição aleatória de um novo circuito, incrementando seu número atual em mais um circuito;

- troca entre dois circuitos candidatos escolhidos aleatoriamente, de modo que o estado de um deles é incrementado em mais um circuito, e o outro é diminuído retirando-se um dos seus circuitos atuais;
- remoção de um circuito escolhido aleatoriamente, diminuindo o número dos seus circuitos atuais.

Este mecanismo pode ser utilizado em duas seqüências diferentes: adição-troca-remoção ou remoção-troca-adição. A primeira é aplicada nos primeiros estágios do processo de expansão enquanto a segunda é aplicada nos últimos estágios da simulação. A metodologia considera um mecanismo que evita o aparecimento de elementos isolados, ou seja, problemas de mau condicionamento da matriz de susceptância de barra [5].

O "Esquema de Esfriamento" é definido por quatro parâmetros, dos quais dependem a eficiência do algoritmo e a qualidade das soluções finais. Mediante este esquema são determinadas as mudanças entre configurações, aceitando-as ou não, segundo sejam cumpridos critérios baseados da teoria de equilíbrio térmico.

Os quatro parâmetros são: temperatura inicial (T_o), temperatura final (T_f), número de processos adição-troca-remoção (N_k), e a taxa de esfriamento ($T_k \rightarrow T_{k+1}$). A análise detalhada destes parâmetros encontra-se na referência [5].

Vantagens:

- Segundo os resultados dos autores a qualidade da solução final não depende da configuração inicial.

Desvantagens:

- Para encontrar a solução ótima global, este processo pode se tornar muito pesado computacionalmente.
- O desempenho do algoritmo dependerá diretamente da especificação e ajuste de parâmetros.

2.4.3.2. Planejamento da Expansão da Transmissão mediante o Procedimento GRASP "*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*" [7]

GRASP é um procedimento iterativo com duas fases associadas a cada iteração: uma fase de *construção*, onde é construída uma solução viável mediante uma técnica de amostragem; e uma fase de *busca local*, que começa da solução da fase de

construção e procura um ótimo local numa vizinhança dada. A melhor solução local é escolhida como ótimo global.

Na *fase de construção*, um algoritmo iterativo constrói uma solução viável mediante a adição de uma variável de cada vez, isto é, colocando-a igual a 1. Para seleccionar esta variável, o algoritmo *GRASP* utiliza uma *função gulosa* ou "*greedy function*" que mede o benefício associado de cada variável assumir o valor de 1. Um algoritmo *guloso* é aquele que toma a melhor decisão com as informações disponíveis naquele momento, como por exemplo, o método Simplex, que escolhe para entrar na base a variável que traz o maior redução da função objetivo.

A cada iteração da *fase de construção*, a escolha da nova variável a ser colocada em 1 é seleccionada aleatoriamente de uma lista de candidatos (*LC*), formada pelas variáveis mais promissórias ordenadas pela *função gulosa*. A técnica de escolha aleatória permite obter soluções diferentes a cada iteração, sem que necessariamente diminua a importância da *função gulosa*. A *fase de construção* termina quando todas as restrições do problema são satisfeitas, isto é, quando é obtida uma solução viável.

As soluções da *fase de construção* não são garantidas de serem localmente ótimas numa vizinhança dada, por que elas são o resultado de adições feitas com um critério míope. Por tanto, é aplicado um procedimento de *busca local* que tenta melhorar cada solução da *fase de construção*. Em termos gerais, o algoritmo de *busca local* procura outras soluções melhores na vizinhança da solução atual. Isto termina quando não existem melhores soluções nessa vizinhança.

O modelo do problema de planeamento da expansão da transmissão é similar ao do modelo linearizado do item 2.3.2, para determinar a nova variável a ser adicionada à rede é utilizado como critério básico de estimativa, o fator de sensibilidade (2.23), com o qual é formada a *LC*.

Vantagens:

- A lógica do *GRASP* possui um algoritmo de fácil implementação computacional.
- Não precisa definir parâmetros de busca externos.

Desvantagens:

- Não é garantido que a fase de *busca local* consiga melhorar adequadamente a solução encontrada na *fase de construção*, o qual pode levar a solução final para um ótimo local de pouca qualidade.

2.4.3.3. Planejamento da Expansão da Transmissão Usando Algoritmos Genéticos, Recozimento Simulado e Busca Tabu [6]

Neste trabalho os autores fazem uma ampla pesquisa de três metodologias heurísticas para a solução do problema de planejamento da expansão da transmissão: recozimento simulado (*RS*), algoritmos genéticos (*GA*) e busca tabu (*BT*), comparam as principais características das três metodologias e apresentam uma visão integrada delas. Depois, é proposto um método híbrido que, segundo os autores, consegue melhores resultados que aqueles obtidos mediante cada método de maneira individual.

O método híbrido utiliza algumas características de *RS*, *GA* e outros algoritmos aproximados e as introduz dentro do esquema de um algoritmo de busca tabu básico.

A Figura 2.3 ilustra as estratégias do método proposto. Na figura também aparecem a função objetivo linear em linhas pontilhadas e uma região viável não convexa. O processo de busca começa encontrando uma família de configurações iniciais mediante um algoritmo de Garver [3]. Usualmente estas configurações aparecem fora da região viável, isto é, existem sobrecargas que precisam de corte de carga.

A estratégia *A* utiliza uma serie de algoritmos aproximados [3, 12, 13] para definir a próxima mudança nas configurações atuais, de tal forma que reduza o custo da expansão em cada uma delas, escolhendo a mudança que dê a maior redução no custo da expansão, e assim ficam definidas as configurações atualizadas. No caso de encontrar ótimos locais, ou seja, nenhuma configuração atual consegue reduzir seu custo, utiliza-se um critério de SA para permitir as mudanças que menos degrade a função objetivo correspondente. Adicionalmente, neste processo são utilizadas listas tabu para evitar adições ou retirada de circuitos e um critério de aspiração. Logo, a estratégia *B* executa uma busca local ou intensificação visitando configurações vizinhas das configurações atuais. Isto é feito mediante remoção ou trocas de circuitos até que não consiga

diminuir o valor do custo da expansão de cada configuração. Finalmente, a estratégia *C* é ativada com a finalidade de retirar circuitos ociosos que foram adicionados na estratégia *B*. O critério de parada da estratégia *A* baseia-se no número de iterações seguidas sem melhoria na redução do custo. Para o processo global o critério de parada está definido pelo número total de ciclos *A*, *B*, *C* completos, para os quais não consegue-se melhorar a solução atual de mínimo custo.

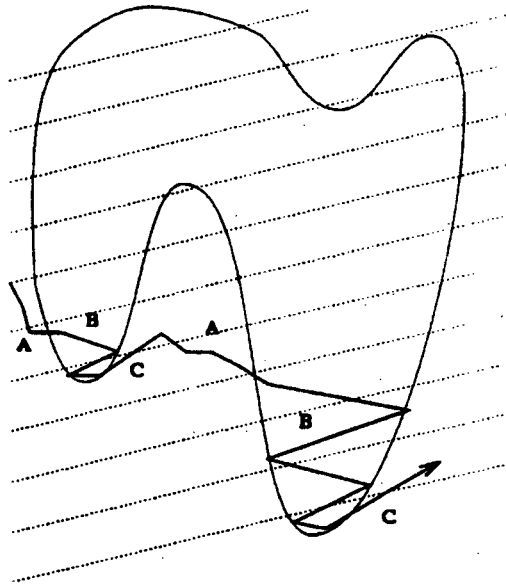


Figura 2.3 Estratégias de busca para o algoritmo híbrido.

Vantagens:

- Segundo os resultados apresentados foram conferidas as melhores soluções para sistemas reais conhecidos.

Desvantagens:

- A metodologia em sua fase *A* necessita do ajuste de parâmetros, o que não é uma tarefa simples.

2.5. CONCLUSÕES

- Como foi mencionado anteriormente, o problema de planejamento da expansão da transmissão de longo prazo é combinatorial, caracterizando-o como um problema de grande porte, onde o número de opções de transmissão que podem ser analisadas cresce exponencialmente com o tamanho da rede.
- Para a representação do problema existem três modelos básicos : Modelo de Transportes, Modelo Linearizado (DC) e Modelo de fluxo de potência AC.
- O nível de qualidade da solução obtida dependerá em boa parte da representação da rede utilizada. Não é conveniente utilizar o modelo não-linear para expansão da transmissão de longo prazo, por dificultar ainda mais o processo de solução, e por não agregar valor relevante à solução.
- Além da natureza combinatorial do problema, a outra dificuldade associada, é a não-convexidade do mesmo, pela qual são garantidas somente soluções ótimas locais.
- Desde o início das pesquisas tem-se desenvolvido diversas metodologias tentando-se melhorar cada vez mais a qualidade da solução. Neste trabalho foram mencionados alguns dos métodos mais representativos, os quais foram divididos em algoritmos convencionais e não-convencionais baseados em heurísticas.
- O avanço da capacidade de processamento têm permitido o desenvolvimento das metodologias heurísticas, as quais apresentam resultados bastante satisfatórios.

- As metodologias heurísticas tais como *GA*, *BT*, *SA*, e *GRASP* possuem a vantagem de serem paralelizáveis, o que permite diminuir consideravelmente os tempos de processamento.
- A desvantagem das metodologias heurísticas está em que as provas teóricas de convergência precisam de pressupostos ideais, como por exemplo número infinito de iterações, uma população de mostra infinita, etc, o que impede ter certeza da sua convergência para o ótimo global quando são utilizados supostos reais.

CAPÍTULO 3

CONCEITOS BÁSICOS DE BUSCA TABU

3.1. INTRODUÇÃO

A *Busca Tabu (BT)* é uma estratégia para solucionar problemas de otimização combinatorial cuja gama de aplicações vai desde aplicações específicas até problemas gerais de programação inteira e inteira-mista. É um procedimento adaptativo com a habilidade de superar as limitações de otimalidade local.

BT teve suas origens em procedimentos combinatoriais aplicados a problemas não-lineares ao final de 1970, e subsequenteemente aplicado a uma diversa coleção de problemas com os quais têm conseguido um impressionante sucesso prático. O uso de *BT* torna possível obter soluções de qualidade superior em relação àquelas obtidas previamente com estratégias concorrentes, e geralmente com menor esforço computacional.

Neste capítulo são apresentados os princípios básicos que conformam a *BT* como uma estratégia para solução de problemas de otimização combinatorial. Maiores detalhes sobre *BT* são encontrados no Apêndice A.

3.2. BASES DA BUSCA TABU

A seguir, são apresentados os conceitos básicos que formam um processo de *Busca Tabu*. Para descrever estes conceitos, representa-se um problema de otimização combinatorial da seguinte maneira:

$$(P) \quad \text{Minimizar} \quad c(x): x \in X \text{ em } R_n$$

A função objetivo $c(x)$ pode ser linear ou não-linear, e a condição $x \in X$ é imposta para restringir os componentes de x a assumirem valores discretos. Uma ampla gama de procedimentos heurísticos e/ou baseados em programação matemática podem ser colocados na forma de (P) , permitindo a seleção de uma seqüência de *movimentos* que levam o problema de uma *solução candidata*, $x \in X$, para um ótimo local.

A estrutura geral do processo de busca utiliza os conceitos de *movimentos*, *lista tabu*, *critério de aspiração*, *intensificação*, *diversificação* e *freqüência*, os quais são apresentados a seguir:

3.2.1. MOVIMENTOS

O primeiro passo de *BT* é definir um conjunto de *movimentos* que possam ser aplicados a uma solução de prova para produzir uma solução nova. O objetivo consiste em determinar os movimentos que possam diminuir o valor da função objetivo $c(x)$. Quando não existem *movimentos* que melhorem o valor atual de $c(x)$, tem-se um ótimo local, e nesse caso, *BT* escolhe o *movimento* que menos degrade a função objetivo.

O *movimento* é definido segundo o tipo de problema formulado. De forma geral podem ser identificados três tipos de movimentos básicos:

- *adição*: No qual um elemento inteiro de x passa de 0 para 1. Por exemplo seja o vetor $x=(0,1,1,1,0)$, uma *adição* aplicada ao primeiro elemento de x o levaria para $x'=(1,1,1,1,0)$;
- *retirada*: Este é o movimento contrario da *adição*, ou seja, um elemento de x mude seu valor de 1 para 0. Seguindo com o exemplo, retirando o quarto elemento de x obtém-se $x''=(0,1,1,0,0)$;
- *troca*: Este movimento combina a *adição* e *retirada* fazendo com que dois elementos de x possam ser alterados, aplicando *adição* em um deles e *retirada* no outro. Por exemplo, para o vetor x a *troca* do primeiro elemento com o quarto daria $x'''=(1,1,1,0,0)$;

3.2.2. LISTA TABU

Com a finalidade de evitar o retorno à solução visitada anteriormente, o *movimento* inverso que prejudica a obtenção da solução ótima deve ser proibido. Assim, esse *movimento* é armazenamento numa estrutura de dados, com comprimento finito, denominada *lista tabu*.

Os elementos da *lista tabu* são denominados *movimentos* tabu e tem por finalidade evitar ciclagem do processo.

Cada vez que uma solução de prova é gerada, ela é testada para saber se pertence ou não à *lista tabu*. Assim, o espaço de busca correspondente é amplamente reduzido comparado com sua extensão normal. Esta lista pode ser relacionada como um

mecanismo de *memória de curto prazo* que serve como orientação básica do processo de busca.

A dimensão da *lista tabu* é denominada de tamanho da lista tabu. Escolher esse tamanho é uma questão crítica, pois se muito grande, podem ser proibidos movimentos atrativos impedindo explorar soluções de boa qualidade. Enquanto um valor muito pequeno pode causar ciclagem no processo de busca, fazendo o algoritmo retornar para soluções visitadas anteriormente.

3.2.3. CRITÉRIO DE ASPIRAÇÃO

Dado que a *lista tabu* pode evitar alguns movimentos valiosos ou interessantes, que levariam a melhores soluções que as melhores encontradas até então, é utilizado um *critério de aspiração* para permitir que movimentos tabu sejam liberados no caso de serem julgados interessantes. De outra forma, o *critério de aspiração* permite selecionar "excelentes" movimentos tabu, se o nível de aspiração é atingido.

3.2.4. INTENSIFICAÇÃO E DIVERSIFICAÇÃO

A *BT* utiliza duas técnicas denominadas *intensificação* e *diversificação* com a finalidade de procurar o ótimo global do problema.

A *intensificação* é um processo encarregado de encontrar a solução ótima na vizinhança de um ponto de solução atual, ou seja, tenta melhorar a solução atual procurando em soluções vizinhas desse ponto. Se este processo não for feito, a busca torna-se uma amostragem iterativa aleatória.

A *diversificação* tem como objetivo levar o processo de busca para regiões inexploradas do espaço de soluções. Assim, se um problema não convexo possui um ótimo local que é encontrado mediante o processo de *intensificação*, a *diversificação* forçará o processo de busca para sair desse ponto e, procurar em outras regiões do espaço de soluções, para encontrar o mínimo global do problema. A solução definitiva da busca será aquele ponto viável com o qual consegue-se o menor valor da função objetivo. Se a *diversificação* não fosse utilizada, o processo de busca poderia ficar preso numa região sub-ótima do espaço de soluções.

A *frequência* é um contador utilizado em ambos os processos de *intensificação* e *diversificação*. Este contador denota o número de vezes que uma solução ou um movimento tem sido visitado através do processo de busca. Desta maneira, segundo

o processo no qual é utilizada, a *freqüência* pode dar informações para penalizar ou incentivar a execução de um determinado *movimento*.

3.2.5. CRITÉRIO DE PARADA

O critério que determina o final do processo de busca muda segundo o problema, mas geralmente está definido por uma ou várias das seguintes razões:

- ultrapassa um limite de iterações estabelecido;
- encontra um número de soluções determinado;
- não consegue melhorar a solução atual num número dado de iterações;
- não encontra uma solução viável.

Neste trabalho são utilizados todos os conceitos enunciados anteriormente. Embora tenham sido apresentados superficialmente neste capítulo, cada conceito é apresentado com maior detalhe na medida em que sejam utilizados na aplicação particular do problema de expansão da transmissão.

3.3. CONCLUSÕES

- A *Busca Tabu (BT)* é uma técnica que reúne um conjunto de diferentes métodos e procedimentos heurísticos, com os quais podem ser resolvidos problemas de otimização combinatória, *BT* busca superar as limitações da otimalidade local, conseguindo encontrar soluções ótimas. Os conceitos básicos que conformam esta heurística são: *Movimento*, *Lista Tabu*, *Critério de Aspiração*, *Intensificação* e *Diversificação*.
- O *Movimento* é a primeira característica do método, basicamente é a maneira de conduzir da solução atual à nova. Considerando que cada movimento causa uma mudança na função objetivo $c(x)$, o objetivo consiste em determinar os movimentos que possam melhorar o valor de $c(x)$. Se tais movimentos não forem encontrados, então o problema está num ótimo local. Nesta situação seleciona-se o movimento que menos degrada a função objetivo.
- A definição de *movimento* é específica do problema em particular, e deve ser entendida, de forma geral, como a maneira de mover-se através do espaço de soluções procurando a "melhor" solução neste espaço.
- Um dos mecanismos fundamentais da *BT* para a exploração da memória do processo de busca, é a classificação de um subconjunto de movimentos como proibidos ou tabu. A classificação depende da história da busca e tenta evitar o retorno a pontos de solução visitados anteriormente. Estes movimentos proibidos são armazenados numa estrutura de dados chamada *lista tabu*. Esta lista é formada por um subconjunto do espaço de movimentos disponíveis, onde seus elementos são chamados *movimentos tabu*.

- O tamanho da *lista tabu* é um parâmetro importante, já que sendo grande, poderia proibir movimentos atraentes que levariam a soluções de alta qualidade. Por outro lado, se o tamanho é pequeno, poderia ocorrer ciclagem no processo de busca e o algoritmo poderia retornar para soluções já visitadas.
- As restrições tabu não são completamente rígidas. Quando um *movimento tabu* gera uma solução melhor do que outras visitadas até então, sua classificação tabu pode ser ignorada. A condição que permite isto, é o *critério de aspiração*, que permite a realização de movimentos que, mesmo sendo *tabu*, são julgados úteis ou interessantes.
- Com a finalidade de encontrar a "melhor" solução ótima, *BT* utiliza duas técnicas complementares denominadas *intensificação* e *diversificação*, ambas servem para evitar que *BT* realize um processo de busca aleatório, ou fique cativo numa região sub-ótima. Mediante a *intensificação*, *BT* realiza uma busca na vizinhança da solução sub-ótima, tentando melhorar a qualidade da solução encontrada. A *diversificação* direciona a busca para regiões inexploradas do espaço de soluções, para isto, utiliza o conceito de *frequência* que ajuda o processo na busca de novas soluções, evitando selecionar movimentos já realizados.
- O conceito de *frequência* é definido como um indicador do número de vezes que um movimento é visitado durante o processo de busca. Basicamente é utilizado nos processos de *intensificação* e *diversificação* onde a história de busca é importante.

CAPÍTULO 4

BUSCA TABU APLICADA AO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são tratados os conceitos da *Busca Tabu* aplicados ao problema do planejamento da expansão da transmissão. Inicialmente, apresenta-se a formulação do problema. Em seguida é apresentada a estrutura geral do processo de busca. Posteriormente, são detalhados os processos de *expansão da rede*, *intensificação* e *diversificação*, com base nos conceitos de *BT* e, finalmente, são apresentadas as conclusões.

Para facilitar a apresentação dos conceitos de *BT* utiliza-se um sistema teste de dimensão reduzida.

4.2. DECOMPOSIÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO

Neste trabalho, o problema de planejamento da expansão da transmissão é decomposto em dois subproblemas: um de *investimento* e outro de *operação*.

O subproblema de *investimento* toma as decisões de adição, troca ou remoção de circuitos, sendo estas decisões baseadas nos conceitos de *BT* que serão expostos posteriormente. O subproblema de *operação* recebe as decisões de *investimento* e analisa o comportamento da rede no que concerne às restrições operativas. Para isto, é utilizado um algoritmo de programação linear. A solução do subproblema de *operação* entrega ao subproblema de *investimento* informações de fluxos nas linhas f_{ij} , cortes de carga r , e *fatores de sensibilidade* π_{kl} . Estas informações, associadas de outros indicadores baseados nos conceitos de *BT*, permite ao subproblema de *investimento* decidir sobre as novas mudanças a serem efetuadas na rede.

A Figura 4.1 ilustra de maneira geral como foi feita a decomposição do problema original:

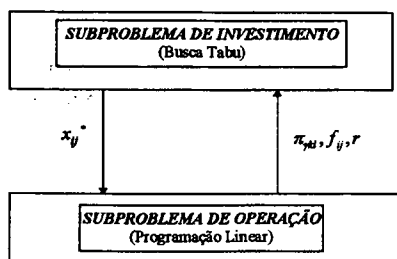


Figura 4.1. Decomposição do Problema

A solução do subproblema de *investimento* é obtida via um algoritmo baseado nos critérios da *Busca Tabu*, o qual divide-se em diferentes processos que serão detalhados posteriormente.

O subproblema de *operação* corresponde ao modelo de fluxo de potência linearizado, ou seja:

$$\text{Minimizar} \quad z = \sum_{k=1}^{Nb} r_k \quad (4.1)$$

Sujeito a

$$Sf + g + r = d \quad (4.2)$$

$$f_{ij} - (\gamma_{ij}^0 + x_{ij}^*)(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (4.3)$$

$$|f_{ij}| - x_{ij}^* \bar{\phi}_{ij} \leq \gamma_{ij}^0 \bar{\phi}_{ij} \quad (4.4)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g}; \quad 0 \leq r \leq d \quad (4.5)$$

Onde:

- x_{ij}^* valor total da susceptância adicionada do ramo $i-j$;
- r vetor do corte de carga das barras;
- S matriz de incidência dos ramos;
- f vetor de fluxos de potência ativa dos ramos;
- g vetor de injeções de potência ativa das barras;
- d vetor de demanda das barras;
- f_{ij} fluxo através do ramo $i-j$;
- \bar{f}_{ij} fluxo máximo permitido do ramo $i-j$;
- γ_{ij}^0 susceptância inicial do ramo $i-j$;

- θ_i, θ_j ângulos de tensão das barras terminais do ramo $i-j$;
- $\bar{\phi}_{ij}$ diferença angular máxima, definido como a relação: $\bar{\phi}_{ij} = \bar{f}_{ij} / \gamma_{ij}$;
- \bar{g} vetor de capacidades de geração máximas das barras;
- Nb número de barras da rede.

O problema de *investimento* modifica o vetor x_{ij}^* e o passa ao subproblema de *operação*, sendo que a cada decisão é solucionado o fluxo de potência ótimo DC correspondente.

Este processo de troca de informações entre subproblemas continua até que todas as restrições operativas sejam cumpridas, e o subproblema de *investimento* decide que não precisa incluir novas adições à rede.

4.3. ESTRUTURA GERAL DO PROCESSO DE BUSCA

O modelo de planejamento da expansão da transmissão desenvolvido neste trabalho possui três importantes processos, denominados *expansão da rede*, *intensificação* e *diversificação*, a seguir, são enunciados estes processos de forma global, com o intuito de mostrar um "mapeamento" do processo completo.

A Figura 4.2 ilustra de forma geral como agem os diferentes processos na busca da solução ótima global do problema, onde a linha contínua representa a região viável não-convexa, e as linhas pontilhadas representam a função objetivo linear definida pelo somatório dos custos de investimento e de operação.

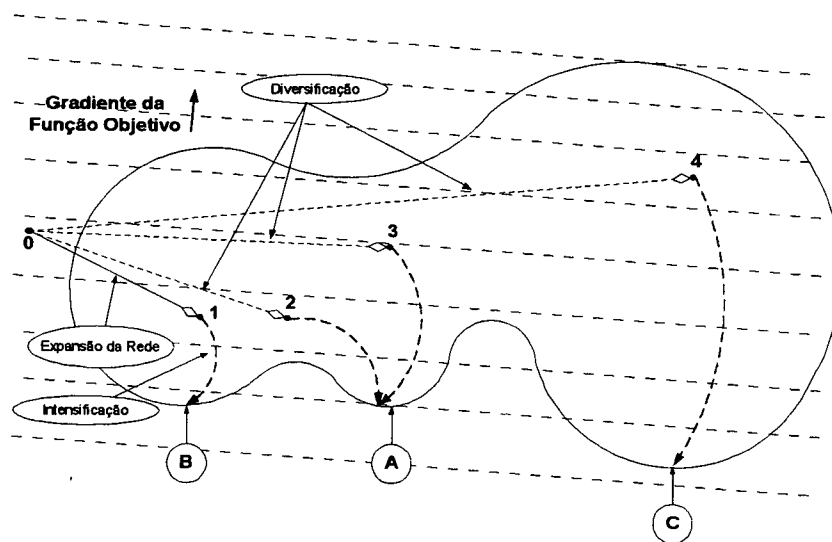


Figura 4.2 Processo de busca

1) *Processo de Expansão da rede*

Inicialmente, este processo define um ponto de partida ou rede inicial conexa, correspondente ao ponto 0, a partir do qual, a rede será expandida mediante adições de circuitos. A maneira de fazer essas adições obedece a critérios de seleção que serão explicados detalhadamente em seções posteriores. A expansão tem como finalidade determinar uma rede conexa viável, isto é, sem corte de carga. A partir deste ponto passa-se a procurar uma configuração de mínimo custo. Assim, isto corresponde a trajetória 0-1 da figura anterior.

As partes que conformam este processo são:

- *conectividade inicial da rede*: é um procedimento que consegue uma rede conexa, não viável, que serve de ponto de partida para a expansão;
- *movimentos*: no processo de expansão, consistem de adições de circuitos;
- *critérios de movimento*: estes critérios definem quais os movimentos ou adições que devem ser efetuadas para expandir a rede;
- *lista tabu*: utilizada para orientar a seleção dos critérios de movimento, evitando a conexão sucessiva de circuitos paralelos aos já ligados;
- *critério de aspiração*: com este critério permite-se fazer movimentos que estejam incluídos na lista tabu, ou seja, permite a adição de circuitos paralelos;
- *frequência da expansão*: este conceito ajuda na determinação da rede expandida mais conveniente para iniciar o processo posterior de intensificação da solução atual, selecionando os circuitos mais frequentes encontrados na solução de diferentes processos de expansão.

2) *Processo de intensificação*

Ao se obter uma rede viável mediante o processo de expansão da rede, que será denominada "ponto viável inicial", a *intensificação* é utilizada para retirar e/ou trocar circuitos ligados no processo de expansão, de maneira a encontrar uma rede também viável, mas de menor custo que a obtida pela expansão. Na figura, este processo

está ilustrado na trajetória 1-B. O resultado da *intensificação* é uma rede considerada como ótimo local, ilustrada pelo ponto B da figura anterior.

Este processo está dividido em dois procedimentos independentes:

- *Procedimento de intensificação I*: A partir da rede obtida pela expansão, são procuradas trocas dos circuitos existentes por circuitos de menor custo;
- *Procedimento de intensificação II*: Este procedimento, é similar ao anterior, com a diferença de permitir trocas de circuitos por outros que incrementem o custo da expansão até um limite preestabelecido.

3) *Processo de diversificação*

Este processo ajuda determinar outras redes viáveis de mínimo custo, por exemplo os pontos A, e C da Figura 4.2, de modo a encontrar a configuração de menor custo dentro do espaço de soluções, e assim, conseguir evitar as limitações da otimalidade local inerentes ao problema e, possivelmente, chegar na solução ótima global. Os elementos que compõem este processo são a *frequência da diversificação* e a *lista tabu de diversificação*, os quais são detalhados em seções posteriores.

A seguir são detalhados cada um dos processos, seguindo passo a passo a maneira como o modelo se movimenta dentro da região viável, até conseguir chegar na solução do problema.

4.4. PROCESSO DE EXPANSÃO DA REDE

Neste trabalho, o problema de planejamento da expansão da transmissão é solucionado mediante vários processos, os quais orientam a busca com o intuito de encontrar a configuração viável de mínimo custo. O primeiro processo é a *expansão da rede*, que tem a finalidade encontrar uma rede viável, isto é, sem corte de carga, que sirva como ponto de partida para processos posteriores. O processo de *expansão da rede* é composto pelos seguintes procedimentos: *conectividade inicial da rede*, *movimentos*, *lista tabu*, *critério de aspiração*, *frequência* e *expansão inicial*.

No contexto da *BT*, este processo equivale a encontrar uma solução, ou um "ponto" dentro da região viável, para que depois, mediante outros processos, seja realizada uma busca na vizinhança da solução inicial visando encontrar um mínimo local. A Figura 4.3 ilustra o primeiro processo desta metodologia.

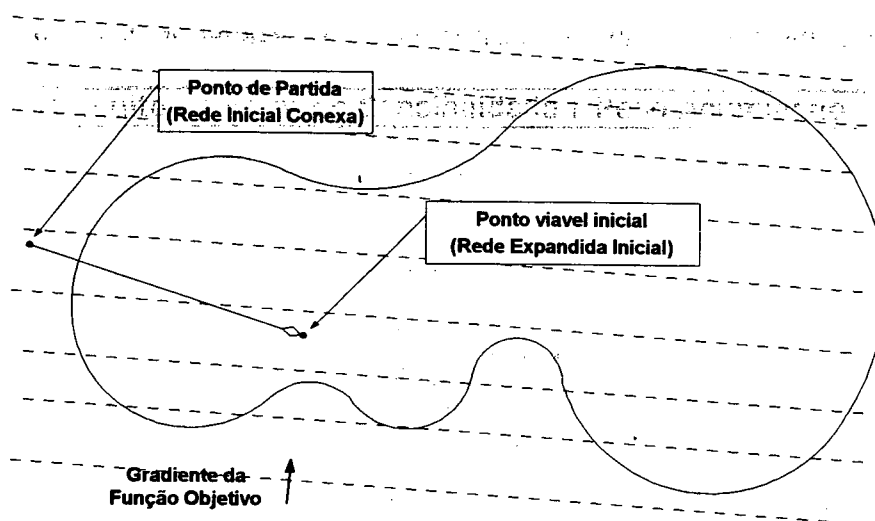


Figura 4.3 Processo de Expansão

A seguir, são detalhados cada um dos procedimentos que formam o processo de *expansão da rede*.

4.4.1. CONECTIVIDADE INICIAL DA REDE

Da Figura 4.3, pode-se observar que a determinação do "ponto de partida" é o primeiro passo para começar o processo de *expansão*. Este ponto corresponde a uma rede inicial conexa que permita solucionar o subproblema de *operação*, e assim obter as primeiras informações sobre o desempenho do sistema planejado.

Existem diferentes maneiras de determinar essa rede inicial [1]. Neste trabalho foram desenvolvidos dois procedimentos, os quais são descritos a seguir:

- ♦ tipo I: neste procedimento o sistema é completamente conectado de modo que cada barra seja ligada ao sistema por, pelo menos, um circuito.
- ♦ tipo II: com este procedimento, consegue-se uma rede inicial melhor condicionada que a do tipo I, já que exige-se no mínimo, dois circuitos ligando cada barra nova.

Em ambos os tipos, a seleção de circuitos para a rede inicial obedece a critérios de mínimo custo, começando pelos circuitos de menor custo. Logicamente esta seleção faz com que a rede resultante possa não ser uma solução viável e, de modo que alguns dos circuitos não pertençam à solução definitiva. Não obstante, ambos os tipos de rede inicial oferecem um ponto de partida adequado para os procedimentos posteriores.

Para exemplificar, faz-se referência ao bem conhecido caso de 6 barras de Garver [3], cujas informações relevantes aparecem nas seguintes duas tabelas. A rede inicial deste sistema teste é ilustrado na Figura 4.4.

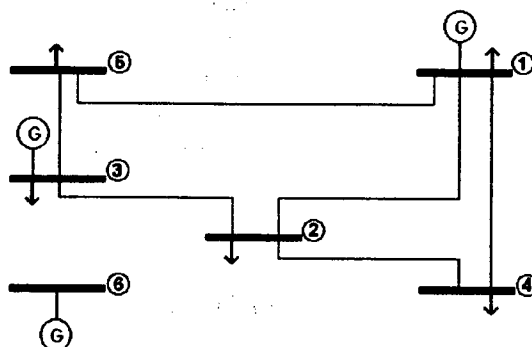


Figura 4.4 Sistema Exemplo de 6 barras

Tabela 4.1 Dados de Barras

Barra	Geração (MW)	Carga (MW)
1	150	80
2	0	240
3	360	40
4	0	160
5	0	240
6	600	0

Tabela 4.2 Dados dos Circuitos Candidatos

Terminais	Y (p.u.)	Capacidade (MW)	Custo (\$)
1-2	2,08	100	48
1-3	2,63	100	38
1-4	1,67	80	60
1-5	5,00	100	20
1-6	1,47	70	68
2-3	5,00	100	20
2-4	2,50	100	40
2-5	3,23	100	31
2-6	3,33	100	30
3-4	1,69	82	59
3-5	5,00	100	20
3-6	2,08	100	48
4-5	1,59	75	63
4-6	3,33	100	30
5-6	1,64	78	61

Para este caso, a rede inicial radial conexa de mínimo custo obtida mediante o procedimento tipo I, corresponde com a rede inicial mais *um* circuito: 2-6 ou 4-6, já que ambos os circuitos possuem igual custo, e são as alternativas de menor custo

para ligar radialmente a nova barra 6. No caso de utilizar o procedimento tipo II, a rede original ficará com *dois* circuitos adicionais: 2-6 e 4-6, por serem os dois circuitos de menor custo com os quais pode-se ligar a nova barra 6 ao sistema original.

4.4.2. MOVIMENTOS NO PROCESSO DE EXPANSÃO

Após obtida uma rede inicial conexa, a rede é expandida com a finalidade de se eliminar os cortes de carga. Para tanto aplica-se o conceito de *movimento*, o qual é realizado com base em um conjunto de heurísticas que são detalhadas nas próximas seções.

Segundo a teoria da *BT* o *movimento* é a maneira pela qual pode-se trasladar de um ponto x atual para um outro x' , no qual é encontrado um novo valor da função objetivo dado por $c(x')=c(s(x))$, onde $s(x)$ corresponde ao movimento aplicado a x ; a idéia é aplicar o $s(x)$ mais adequado, que permita melhorar a cada passo o valor da função objetivo. Caso não se consiga melhorá-lo, então deve-se escolher o $s(x)$ que menos degrade a função objetivo.

De uma forma geral, o *movimento* consiste na adição ou retirada de circuitos. Para o processo de *expansão* a definição de *movimento* é determinada pela adição de circuitos candidatos, isto é, circuitos candidatos são ligados à rede inicial conexa de modo a cumprir com os *critérios de movimento* preestabelecidos.

A seguir, serão explicados os diferentes critérios de movimento heurísticos mediante os quais é escolhida a próxima adição ou adições de circuitos.

4.4.2.1. Critério baseado no Fator de Sensibilidade

Depois de calcular a solução do subproblema de *operação*, um conjunto de circuitos candidatos é avaliado, buscando-se identificar os circuitos mais interessantes para serem ligados à rede. O primeiro critério de avaliação, e o mais importante, é o *fator de sensibilidade em relação à susceptância*, que expressa a redução no custo de operação causada pela redução do corte de carga, devido ao reforço de capacidade marginal no ramo $i-j$.

Segundo é demonstrado no apêndice B os circuitos "críticos" de um sistema de transmissão podem ser identificados mediante duas maneiras:

- 1) Sensibilidade em relação ao limite de fluxo \bar{f}
- 2) Sensibilidade em relação à susceptância γ

O fator de sensibilidade em relação à susceptância é o mais indicado, e pode ser calculado facilmente pela seguinte expressão:

$$\sigma_{ij} = (\pi_i^0 - \pi_j^0)(\theta_j - \theta_i); \quad \forall (i, j) \in \Omega \quad (4.6)$$

Onde:

- π_i^0 variável dual ou multiplicador de Lagrange associado à restrição (4.2) do subproblema de *operação*;
- Ω representa o conjunto de todos os ramos onde são permitidas adições de novos circuitos.

Baseados neste fator, inicia-se o procedimento de seleção dos próximos circuitos candidatos que serão incluídos na rede, que compõe-se dos seguintes passos:

- I) ordenar todos os circuitos candidatos disponíveis em ordem descendente de *fator de sensibilidade*, do maior ao menor fator;
- II) selecionar os N circuitos candidatos com maior *fator de sensibilidade* e descartar os restantes;
- III) para os N circuitos selecionados designar pesos a cada um deles, atribuindo-se o peso N ao circuito com o maior fator, $N-1$ ao seguinte, $N-2$ ao próximo, e assim sucessivamente até chegar ao último circuito que faz parte do conjunto. Em caso de empate é designado igual peso aos circuitos candidatos empatados.

Até este ponto é definido o conjunto dos N circuitos candidatos, com os respectivos pesos. A escolha do novo *movimento* ou adição de circuito ainda não pode ser decidida, já que este critério é um indicador baseado na sensibilidade em relação à susceptância (4.6) e, sem considerar os custos dos circuitos, podem levar a decisões "incorretas", que poderiam inviabilizar o plano de expansão desde o ponto de vista econômico.

Para o caso de 6 barras, com rede inicial conexa radial, tem-se os *fatores de sensibilidade* e os pesos correspondentes para os 10 "melhores" circuitos ilustrados na Tabela 4.3:

Tabela 4.3 Designação de pesos baseado no *fator de sensibilidade*

Circuito	Fator de Sensibilidade	Peso Acumulado
1-2	0,000E+00	1
1-3	0,000E+00	0
1-4	1,460E-08	6
1-5	8,630E-09	5
1-6	-1,450E-01	0
2-3	0,000E+00	0
2-4	4,570E-09	3
2-5	-1,390E-09	0
2-6	3,030E-01	9
3-4	8,060E-09	4
3-5	2,090E-09	2
3-6	1,470E-01	7
4-5	0,000E+00	0
4-6	5,070E-01	10
5-6	2,400E-01	8

4.4.2.2. Critério baseado no custo dos circuitos candidatos

Depois de definir o conjunto dos N circuitos candidatos com os respectivos pesos, o seguinte critério de avaliação é o custo dos circuitos.

Para tanto, ordena-se os N circuitos previamente selecionados pelo critério de *fator de sensibilidade* em ordem ascendente de custo, do menor para o maior custo. Ao peso atual do circuito de menor custo soma-se o valor N , ao seguinte circuito em ordem crescente de custo soma-se $N-1$, ao próximo $N-2$, e assim sucessivamente, até se chegar ao último circuito que faz parte do conjunto.

Este critério "filtra" mais um pouco a informação proveniente do *fator de sensibilidade*, já que avalia a conveniência econômica da adição de um circuito que pode ser muito atraente com base no critério inicial do *fator de sensibilidade*, mas que pode ser economicamente inviável ou pouco recomendável.

Seguindo com o exemplo, para o conjunto de circuitos candidatos, a incorporação do critério de custo altera os índices de mérito dos circuitos da forma ilustrada na Tabela 4.4

Tabela 4.4 Designação de pesos baseada no custo dos circuitos candidatos

Circuito	Custo (\$)	Peso por Fator de Sensibilidade	Peso anterior Acumulado	Peso por Custo	Peso Total Acumulado
1-2	48	1	1	6	7
1-3	-	-	-	-	-
1-4	60	6	6	2	8
1-5	20	5	5	10	15
1-6	-	-	-	-	-
2-3	-	-	-	-	-
2-4	40	3	3	6	9
2-5	-	-	-	-	-
2-6	30	9	9	8	17
3-4	59	4	4	3	7
3-5	20	2	2	10	12
3-6	48	7	7	4	11
4-5	-	-	-	-	-
4-6	30	10	10	8	18
5-6	61	8	8	1	9

4.4.2.3. Critério baseado na susceptância dos circuitos candidatos

O seguinte critério a ser considerado, consiste na avaliação das susceptâncias dos N circuitos do conjunto selecionado, os passos para esta avaliação são os seguintes:

- I) ordenar os N circuitos candidatos em ordem decrescente de susceptância, do maior peso ao menor;
- II) ao peso atual do circuito de maior susceptância soma-se um valor N , ao seguinte circuito em ordem de menor susceptância soma-se $N-1$, ao próximo $N-2$, e assim sucessivamente, até se chegar ao último circuito do conjunto.

Este terceiro critério, serve para evitar decisões de expansão de pouco impacto na redução do corte de carga na rede, tais como circuitos em níveis baixos de tensão, os quais podem ser atrativos por seu baixo custo, mas que tecnicamente podem propiciar soluções de pouco "fôlego".

Para o caso do exemplo que está sendo analisado, a avaliação segundo a susceptância fornece o seguinte resultado:

Tabela 4.5 Designação de pesos baseado na susceptância dos circuitos candidatos

Circuito	Y (p.u.)	Peso por Fator de Sensibilidade	Peso por Custo	Peso anterior Acumulado	Peso por Susceptância	Peso Total Acumulado
1-2	2,50	1	6	7	6	13
1-3	2,63	-	-	-	-	-
1-4	1,66	6	2	8	2	10
1-5	5,00	5	10	15	10	25
1-6	1,47	-	-	-	-	-
2-3	5,00	-	-	-	-	-
2-4	2,50	3	6	9	6	15
2-5	3,22	-	-	-	-	-
2-6	3,33	9	8	17	8	25
3-4	1,70	4	3	7	3	10
3-5	5,00	2	10	12	10	22
3-6	2,08	7	4	11	4	15
4-5	1,58	-	-	-	-	-
4-6	3,33	10	8	18	8	26
5-6	1,64	8	1	9	1	10

4.4.2.4.Critério de fluxo através dos circuitos

Este critério é utilizado como forma de "desempate" dos pesos de circuitos candidatos. Assim, se vários circuitos candidatos possuem igual soma de pesos, aqueles cujo carregamento estejam no limite, terão um incremento adicional de 1 na soma total, permitindo que possam ser escolhidos preferencialmente entre os candidatos mais atrativos.

No exemplo, até agora somente têm sido ligado o circuito 2-6, a Tabela 4.6 ilustra o resultado final da designação de pesos segundo o último critério.

Tabela 4.6 Designação de pesos baseado no fluxo através dos circuitos candidatos

Circuito	Fluxo (MW)	Peso por Fator de Sensibilidade	Peso por Custo	Peso por Susceptância	Peso anterior Acumulado	Peso por Fluxo	Peso Total Acumulado
1-2	0,00	1	6	6	13	0	13
1-3	-	-	-	-	-	-	-
1-4	0,00	6	2	2	10	0	10
1-5	0,00	5	10	10	25	0	25
1-6	-	-	-	-	-	-	-
2-3	-	-	-	-	-	-	-
2-4	0,00	3	6	6	15	0	15
2-5	-	-	-	-	-	-	-
2-6	101,00	9	8	8	25	1	26
3-4	0,00	4	3	3	10	0	10
3-5	0,00	2	10	10	22	0	22
3-6	0,00	7	4	4	15	0	15
4-5	-	-	-	-	-	-	-
4-6	0,00	10	8	8	26	0	26
5-6	0,00	8	1	1	10	0	10

Note-se desta tabela que o único circuito que apresenta fluxo é o 2-6 pois neste momento, este é o único circuito necessário para manter a rede conexas.

Neste ponto, a informação relevante para a escolha do próximo movimento está basicamente pronta, intuitivamente, a próxima adição seria a adição do circuito 2-6 ou do circuito 4-6, já que ambos possuem a maior soma dos pesos totais dos

diferentes critérios avaliados, mas, ainda falta considerar algumas questões básicas que determinam a escolha, as quais são apresentadas na continuação.

4.4.3. LISTA TABU

Para definir o próximo *movimento*, que consiste da adição ou adições de circuitos, é necessário avaliar, além dos pesos acumulados, a denominada *lista tabu (LT)*.

LT é um conceito fundamental pertencente aos algoritmos de *BT* e serve como *memória de curto prazo*, com a finalidade de evitar movimentos repetitivos ou cíclicos.

A cada vez que um circuito é escolhido, o mesmo torna-se tabu, isto é, fica proibido de ser escolhido novamente durante um determinado número de *movimentos*, esse número é denominado de *indicador da lista tabu de expansão (J)*.

Este número não pode ser muito pequeno já que pode produzir *ciclagem* da busca, que neste problema é entendido como a repetição da escolha de um *movimento* específico, o que leva a conexões sucessivas de circuitos paralelos. Agora, se *J* é um valor alto, poderia-se limitar demais o espaço de soluções.

Com base nesta exposição, é possível determinar a próxima adição à rede para o exemplo que vem sendo apresentado. Utilizando-se $J=3$, tem-se os resultados da Tabela 4.7:

Tabela 4.7 Escolha do próximo circuito a ser incluído na rede

Circuito	Peso por Fator de Sensibilidade	Peso por Custo	Peso por Susceptância	Peso por Fluxo	Peso Total Acumulado	Indicador Tabu (inicial)	Circuito Selecionado	Indicador Tabu (atual)
1-2	1	6	6	0	13	0	-	0
1-3	-	-	-	-	0	0	-	0
1-4	6	2	2	0	10	0	-	0
1-5	5	10	10	0	25	0	-	0
1-6	-	-	-	-	0	0	-	0
2-3	-	-	-	-	0	0	-	0
2-4	3	6	6	0	15	0	-	0
2-5	-	-	-	-	0	0	-	0
2-6	9	8	8	1	26*	3	-	2
3-4	4	3	3	0	10	0	-	0
3-5	2	10	10	0	22	0	-	0
3-6	7	4	4	0	15	0	-	0
4-5	-	-	-	-	0	0	-	0
4-6	10	8	8	0	26*	0	4-6	3
5-6	8	1	1	0	10	0	-	0

Como o circuito 2-6 foi adicionado para manter a rede conexa, automaticamente seu indicador tabu é $J=3$, ou seja, a adição de um circuito em paralelo fica proibida durante 3 movimentos do processo de *expansão*.

Da Tabela 4.7, pode-se observar que os circuitos 2-6 e 4-6 possuem a mesma soma de pesos totais, mas é escolhido o circuito 4-6, já que o circuito 2-6 foi selecionado previamente.

Depois de selecionado o próximo *movimento*, ou circuito candidato a ser adicionado, o valor *indicador tabu* de cada circuito é diminuído em 1, segundo é ilustrado na Tabela 4.7, de modo que o circuito escolhido fica com o valor J definido anteriormente.

Resumindo, em princípio um circuito somente será escolhido se possuir a maior soma dos pesos dos *critérios de movimento* e não pertencer à *lista tabu*, ou seja, seu *indicador tabu* é zero.

4.4.4. CRITÉRIO DE ASPIRAÇÃO

O *critério de aspiração*, têm a finalidade de permitir que um movimento tabu ativo, possa ser feito, eliminando sua condição de tabu sempre que o processo de busca julgar esse *movimento* como a melhor alternativa disponível, com o intuito de encontrar melhores soluções.

No caso do processo de expansão, este critério serve, basicamente, para permitir a conexão de circuitos paralelos. Assim, se o melhor *movimento* escolhido depois de analisar os diferentes *critérios de movimento*, é um circuito paralelo a um outro conectado anteriormente, o *critério de aspiração* permite sua adição desde que a alternativa de ligar o circuito paralelo, tenha sido selecionada como a "melhor" opção durante um número de vezes igual a J .

Cada ramo da rede tem um limite máximo de circuitos paralelos e, quando este número é alcançado, torna-se impossível ligar mais circuitos, e nesse caso, esse *movimento* será tabu definitivamente.

Para o exemplo em questão, num ponto mais avançado do processo de expansão, é ilustrado o *critério de aspiração* para um caso onde é escolhido novamente outro circuito paralelo ao já existente circuito 2-6:

Tabela 4.8 Escolha de um circuito paralelo como próxima adição

Circuito	Peso Total Acumulado	Indicador Tabu (Inicial)	Circuito Selecionado	Indicador Tabu (atual)
1-2	16	0	-	0
1-3	0	0	-	0
1-4	11	0	-	0
1-5	24	2	-	1
1-6	8	0	-	0
2-3	21	3	-	2
2-4	0	0	-	0
2-5	0	0	-	0
2-6	26	0	2-6	3
3-4	10	0	-	0
3-5	0	0	-	0
3-6	17	0	-	0
4-5	0	0	-	0
4-6	27*	1	-	0
5-6	12	0	-	0

Os critérios de *fator de sensibilidade*, *custo*, *susceptância* e *fluxo* vistos anteriormente, junto com a *lista tabu de expansão* e o *critério de aspiração*, definem os *movimentos* que irão expandindo a rede, diminuindo o corte de carga mediante a adição de novos circuitos. O **critério de parada** deste processo de expansão é **atingido** quando o corte de carga na rede torna-se nulo. A Figura 4.5 ilustra o processo de expansão da rede.

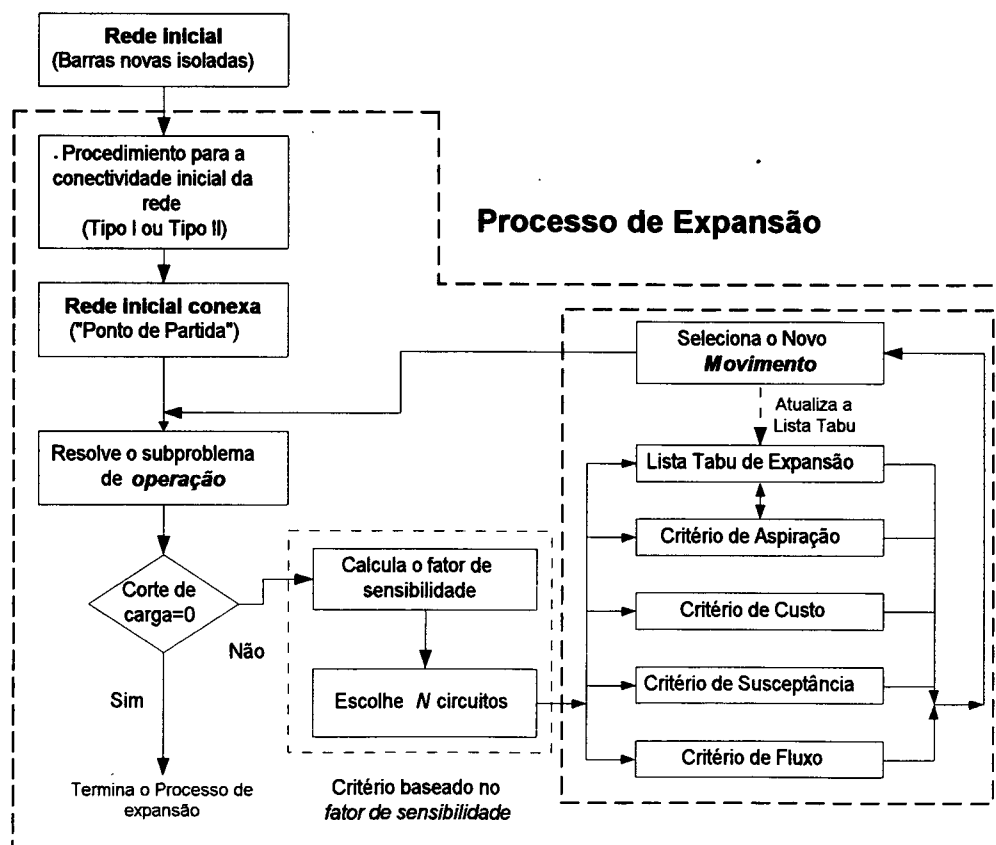


Figura 4.5 Processo de expansão

4.4.5. CONCEITO DE FREQUÊNCIA

Até este ponto da metodologia, a solução do processo de expansão é uma rede viável que intuitivamente pode ser considerada como o "ponto viável inicial" da Figura 4.3. Ressalte-se entretanto, que esse "ponto" pode não estar localizado na vizinhança de um bom mínimo local. Para tanto, a metodologia possui uma estratégia que tenta encontrar a "melhor" rede expandida, isto é, um "ponto viável inicial" perto de um bom mínimo local.

Antes de definir o procedimento para encontrar a "melhor" rede expandida, é necessário definir o conceito de *frequência*, o qual dá a informação básica para encontrar essa rede.

O conceito de *frequência* está relacionado com o conceito de *memória de médio prazo*, cuja finalidade é incorporar ao processo de decisão, o histórico do número de vezes que um *movimento* é visitado na busca de *diferentes soluções*. Assim, pode-se deduzir que um *movimento* de alta frequência, muito provavelmente, será parte da solução ótima global do problema.

Traduzindo o anterior no contexto do problema particular que está sendo analisado, as *diferentes soluções* serão diferentes configurações viáveis de redes expandidas. Assim, a partir da rede inicial conexa, utiliza-se para encontrar cada rede viável, um processo de expansão que é diferenciado pela forma como é selecionado o conjunto dos N circuitos candidatos, dos quais saem as adições.

Depois de encontrar cada rede viável, é utilizado um procedimento que consegue identificar os circuitos mais frequentes utilizados nas diferentes configurações, ou seja, determina a *frequência* com que aparecem na solução das diferentes redes expandidas.

Logo, para encontrar a "melhor" rede expandida, é efetuado um processo denominado *expansão inicial*, que inclui na sua rede inicial conexa os circuitos que possuem alta *frequência*.

Para encontrar diferentes configurações de redes expandidas, a metodologia oferece dois procedimentos heurísticos, denominados P1 e P2. A diferença entre ambos os procedimentos está em que P1 seleciona a cada movimento de expansão apenas um circuito por vez, enquanto P2 adiciona grupos de NC circuitos a cada movimento. A Figura 4.6 ilustra este processo:

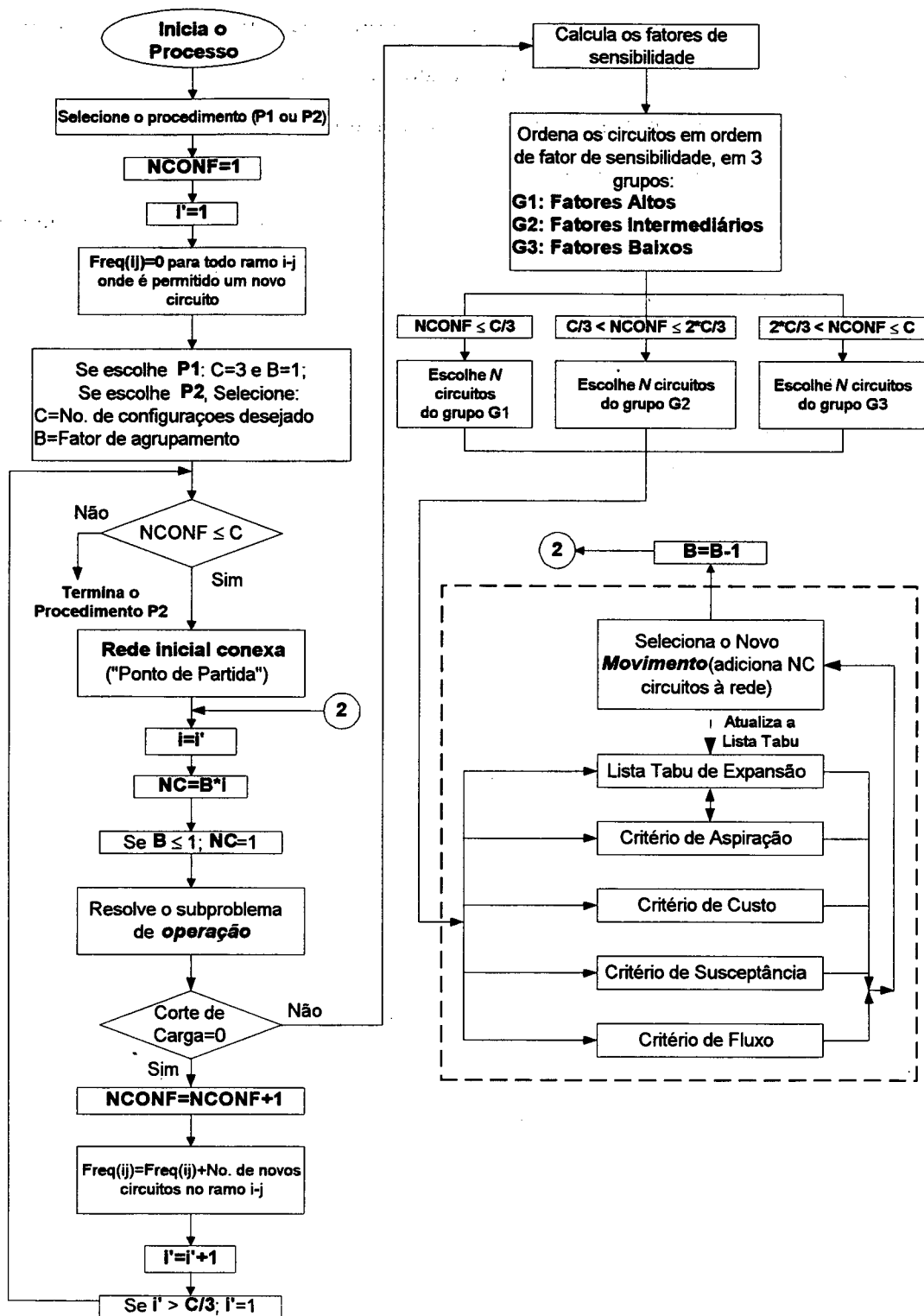


Figura 4.6 Procedimento de busca de diferentes configurações de expansão

Nesta figura, o fator de agrupamento (B) serve para formar grupos variáveis de circuitos, os quais serão adicionados à rede. Por exemplo, para a primeira configuração, ou seja, para $NCONF=1$, com $B=5$, a sequência de adições de circuitos

para o procedimento P2 será em grupos de 5, 4, 3, 2, 1, 1,...,1 circuitos para cada movimento de adição respectivamente.

Qualquer um dos procedimentos P1 ou P2, permite encontrar diferentes configurações sem corte de carga. A informação relevante que sai destes procedimentos, está contida no vetor de *frequência da expansão*, com o qual se começa o processo de *expansão inicial* detalhado a seguir.

O processo de *expansão inicial*, determina a configuração denominada de "ponto viável inicial", a partir de uma rede inicial conexa que inclua os M circuitos mais frequentes. A maneira de escolher os M circuitos é simples:

- I) ordenam-se os elementos do vetor de *frequência da expansão* numa lista do maior para o menor valor;
- II) selecionam-se da lista os M circuitos com os maiores valores, e forma-se com estes M circuitos, a rede inicial conexa, com a qual começa o processo de *expansão inicial* do tipo P1, deixando fixo o contador $NCONF=1$. A rede resultante desta expansão, será considerada como o "Ponto viável inicial" ilustrado na Figura 4.3.

A Figura 4.7 apresenta o fluxograma do processo de expansão com o qual é encontrada a rede de expansão inicial, denominada de "ponto viável inicial".

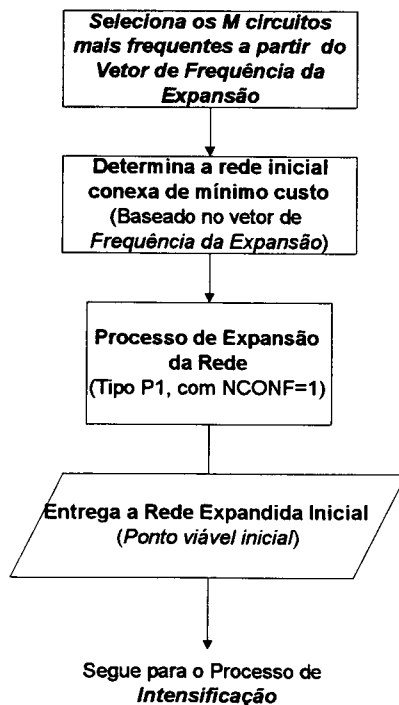


Figura 4.7 Processo de expansão inicial

Para exemplificar os procedimentos anteriores, continua-se com o caso de 6 barras:

Tabela 4.9 Procedimento de expansão P1 no exemplo de 6 barras

Circuito	ITERAÇÃO 4					ITERAÇÃO 5				
	Peso Total Acumulado	Indicador Tabu (Inicial)	Circuito Selecionado	Indicador Tabu (final)	No. de Ctos. ligados na rede	Peso Total Acumulado	Indicador Tabu (Inicial)	Circuito Selecionado	Indicador Tabu (final)	No. de Ctos. ligados na rede
1-2	16	0	-	0	-	0	0	-	0	-
1-3	0	0	-	0	-	0	0	-	0	-
1-4	11	0	-	0	-	10	0	-	0	-
1-5	24	2	-	1	1	25	1	-	0	1
1-6	8	0	-	0	-	0	0	-	0	-
2-3	21	3	-	2	1	0	2	-	1	1
2-4	0	0	-	0	-	0	0	-	0	-
2-5	0	0	-	0	-	13	0	-	0	-
2-6	26	0	2-6	3	2	24	3	-	2	2
3-4	10	0	-	0	-	10	0	-	0	-
3-5	0	0	-	0	-	23	0	-	0	-
3-6	17	0	-	0	-	17	0	-	0	-
4-5	0	0	-	0	-	0	0	-	0	-
4-6	27*	1	-	0	1	26*	0	4-6	3	2
5-6	12	0	-	0	-	14	0	-	0	-
Corte de carga na rede incluindo o novo circuito (MW)					242,00	151,98				

A Tabela 4.9 mostra a escolha do próximo circuito candidato que será ligado à rede, para duas iterações consecutivas do procedimento P1, no qual, é adicionado um circuito a cada vez.

Na medida em que são adicionados circuitos à rede, geralmente o corte de carga vai diminuindo. Contudo, pode acontecer que a adição de um circuito não cause um impacto importante na redução do corte de carga. Nesses casos é provável que esse circuito seja eliminado da solução final mediante os processos de *intensificação*, que serão apresentados posteriormente.

Tabela 4.10 Processo de expansão P2 no exemplo de 6 barras

Circuito	ITERAÇÃO 1					ITERAÇÃO 2				
	Peso Total Acumulado	Indicador Tabu (Inicial)	Circuito Selecionado	Indicador Tabu (atual)	No. de Ctos. ligados na rede	Peso Total Acumulado	Indicador Tabu (Inicial)	Circuito Selecionado	Indicador Tabu (atual)	No. de Ctos. ligados na rede
1-2	13	0	1-2	3	1	16	3	-	2	1
1-3	0	0	-	0	-	0	0	-	0	-
1-4	10	0	-	0	-	11	0	1-4	3	1
1-5	25	0	1-5	3	1	0	3	-	2	1
1-6	0	0	-	0	-	8	0	1-6	3	1
2-3	0	0	-	0	-	24	0	2-3	3	1
2-4	15	0	2-4	3	1	0	3	-	2	1
2-5	0	0	-	0	-	0	0	-	0	-
2-6	26*	3	-	2	1	28	2	-	1	1
3-4	10	0	-	0	-	15	0	3-4	3	1
3-5	22	0	3-5	3	1	0	3	-	2	1
3-6	15	0	3-6	3	1	19	3	-	2	1
4-5	0	0	-	0	-	5	0	-	0	-
4-6	26*	0	4-6	3	1	29*	3	-	2	1
5-6	10	0	-	0	-	14	0	5-6	3	1
Corte de carga na rede incluindo o novo circuito (MW)					280,68	175,88				

Na Tabela 4.10, ilustra-se o procedimento de expansão P2, o qual escolhe em cada *movimento* grupos variáveis de circuitos. Para $B=6$, $i=1$ e $NCONF=1$, segue-se

o seguinte esquema de adições: o primeiro grupo é de $NC=B*i=6*1=6$ circuitos, logo escolhe $NC=B*i=5*1=5$ circuitos, depois $NC=B*i=4*1=4$, e assim sucessivamente até chegar a $B=1$, onde $NC=1$, e continua escolhendo de 1 em 1 circuito.

A seguir, são ilustrados o cálculo do vetor de *frequência da expansão*, utilizando o procedimento de expansão P1 para encontrar três configurações de expansão diferentes, e o resultado da *expansão inicial*.

Tabela 4.11 Cálculo do vetor de *frequência e expansão inicial*

Circuito	Numero de Ctos. Ligados				No. de Circuitos Escolhidos para a Expansão Final (M=3)	Rede de Expansão Final Resultante
	Configuração resultante (1)	Configuração resultante (2)	Configuração resultante (3)	Frequência		
1-2	-	-	-	-	-	-
1-3	-	-	-	-	-	-
1-4	-	-	-	-	-	-
1-5	2	3	2	7	1	2
1-6	-	-	-	-	-	-
2-3	1	1	1	3	-	1
2-4	-	-	-	-	-	-
2-5	-	-	-	-	-	-
2-6	3	3	3	9	1	3
3-4	-	-	-	-	-	-
3-5	1	1	1	3	-	1
3-6	1	1	1	3	-	1
4-5	-	-	-	-	-	-
4-6	3	3	2	8	1	3
5-6	-	-	-	-	-	-

A Tabela 4.11, apresenta as três configurações resultantes do procedimento de expansão P1. Para encontrar a configuração (1), o conjunto dos N circuitos, de onde sai cada nova adição, é formado utilizando os circuitos com os maiores *fatores de sensibilidade*; Para a configuração (2), o conjunto dos N circuitos é formado por circuitos com fatores intermediários; e para a (3) são utilizados os circuitos com os menores fatores.

O vetor de *frequência da expansão*, é calculado segundo foi explicado anteriormente, somando para cada ramo, seu número de circuitos em todas as configurações encontradas, logo, é escolhido o grupo dos M circuitos de maior *frequência*.

Para $M=3$, os circuitos de alta frequência escolhidos são 1-5, 2-6 e 4-6.

Com estes circuitos de alta frequência, é definida a rede inicial conexa do processo de *expansão inicial*. Neste exemplo, a rede inicial encontrada coincide com a configuração (1).

Em resumo, os processos de expansão que permitem o cálculo do vetor de *frequência da expansão*, ajudam ao algoritmo a reiniciar um último processo

denominado *expansão inicial*, que entrega uma rede conexa viável, sem corte de carga, a qual muito provavelmente inclua em sua estrutura, a solução ótima do problema.

O processo seguinte será *intensificar* a busca, para determinar um bom mínimo local na vizinhança da solução atual.

4.5. PROCESSO DE INTENSIFICAÇÃO

A BT define um processo de busca chamado *intensificação*, o qual é utilizado para procurar o mínimo local na vizinhança da *solução atual*.

No contexto do problema de planejamento da transmissão, a *solução atual* é a rede expandida inicial ou "ponto viável inicial", e o objetivo do processo de *intensificação* consiste em determinar a rede de mínimo custo na vizinhança dessa rede atual. A Figura 4.8 ilustra este processo.

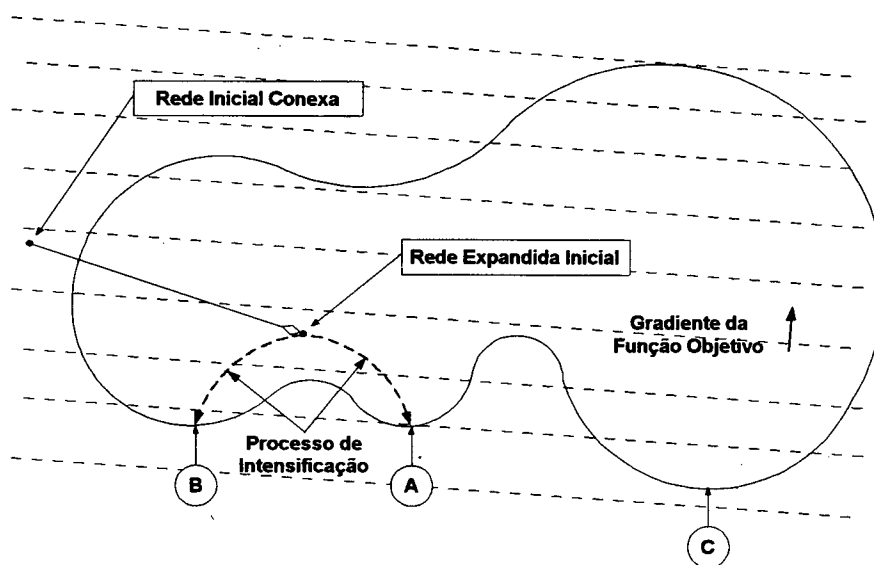


Figura 4.8 Processo de intensificação

O processo de *intensificação* consegue encontrar um mínimo local "próximo" da solução atual; no entanto, o problema de planejamento da transmissão, sendo não convexo, oferece múltiplos mínimos locais, fazendo com que o algoritmo possa encontrar qualquer um deles. Por exemplo, da Figura 4.8 o processo de *intensificação* poderia encontrar o ponto A ou talvez o ponto B, podendo ainda existir um ponto C ótimo global do problema.

Para encontrar uma solução mínima local do problema, a metodologia utiliza dois procedimentos de *intensificação* independentes, que serão denominados Intensificação I e II, os quais baseiam-se em procedimentos heurísticos. O mínimo local

do problema, corresponderá à solução de menor custo, comparando as soluções encontradas por ambos os procedimentos de *intensificação*.

4.5.1. PROCEDIMENTO DE INTENSIFICAÇÃO I

Este procedimento faz uma busca local procurando pontos onde o valor da função objetivo é sempre melhorada a cada *movimento*, de modo a se comportar semelhantemente a um algoritmo guloso. Para o problema de planejamento, isto significa encontrar uma rede viável de menor custo que a atual, orientando a direção de busca baseado na redução do custo da expansão. A Figura 4.9 ilustra o procedimento de intensificação I.

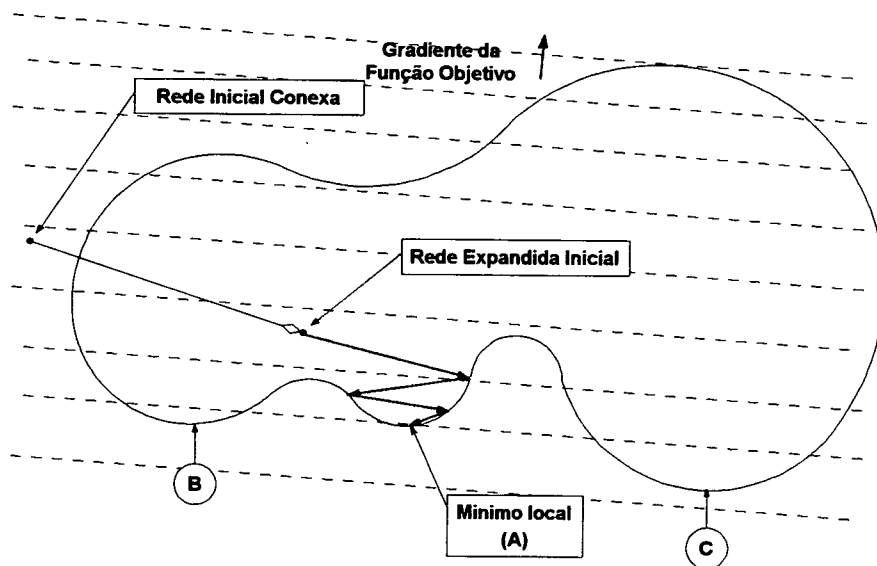


Figura 4.9 Procedimento de intensificação I

O procedimento está dividido em duas fases. Na primeira, são retirados "todos" os circuitos "ociosos" da rede expandida inicial, sempre que essas remoções não causem corte de carga. Nesta fase, a definição de *movimento* muda com respeito à expansão, já que o *movimento* consiste da retirada de circuitos, enquanto na expansão consistia de adições. Os passos que formam a fase 1 são descritos a seguir:

- I) ordenar os circuitos candidatos ligados à rede expandida inicial, em uma lista do menor para o de maior custo;
- II) dessa lista, desligue o circuito de menor custo ainda não testado e solucione o subproblema de *operação*. Se o corte de carga é zero, o circuito fica desligado. Se não, é religado novamente;

III) se ainda faltam circuitos por serem testados vá para o passo II. Se não o procedimento termina.

Seguindo com o exemplo, a fase 1 do procedimento de *intensificação I* para este caso, apresenta o seguinte comportamento:

Tabela 4.12 Procedimento de intensificação I (Fase 1) para o exemplo de 6 barras

Circuito	Número de Circuitos									
	Configuração de Expansão Inicial	Movimento								Configuração Resultante
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-5	2	1*	1	1	1	1	1	0*	1	1
1-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-3	1	1	0*	0	0	0	0	0	0	0
2-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-6	3	3	3	3	2*	3	3	3	3	3
3-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3-5	1	1	1	0*	1	1	1	1	1	1
3-6	1	1	1	1	1	1	0*	1	1	1
4-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4-6	3	3	3	3	3	2*	2	2	1*	2
5-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Corte de Carga (MW)	0,00	0,00	0,00	89,92	58,55	0,00	43,28	1,96	84,55	0,00

A rede resultante é viável e de menor custo que a configuração calculada pelo processo de expansão inicial, mas, ainda falta uma fase do procedimento de *intensificação I*, que faz uma busca mais exaustiva na vizinhança desta ultima solução resultante.

Na segunda fase deste procedimento, o conceito de *movimento* muda para "troca" de circuitos, tentando encontrar aqueles circuitos de menor custo, que possam substituir os existentes, sem que apareça corte de carga. A fase 2 está definida pelos seguintes passos:

- I) ordenar os circuitos candidatos ligados à rede resultante da fase 1, em uma lista do maior para o de menor custo;
- II) dessa lista, desligue o circuito de maior custo, ainda não testado e solucione o subproblema de *operação*. Se o corte de carga é zero, o circuito fica desligado, e vá para o passo V. Se não, vá para o passo III;
- III) selecione o próximo circuito candidato a ser adicionado de maneira similar como é feito no processo de expansão ilustrado na Figura 4.5,

mas sem utilizar os critérios de susceptância e fluxo. Se o circuito selecionado é o de menor custo que o circuito testado em II, vá para o passo IV. Se não religue o circuito testado em II, e vá para o passo V;

IV) adicione o circuito e calcule o corte de carga na rede; se o corte é zero, então a troca de circuitos é efetiva, deixando ligado o circuito selecionado em III e desligado o circuito testado em II. Se não, a troca de circuitos não é efetiva, religando-se então, o circuito testado em II e desligando-se o circuito selecionado em III;

V) se ainda faltam circuitos por serem testados vá para o passo II. Se não o procedimento termina.

Este procedimento é ilustrado na Tabela 4.13, onde são testados os circuitos candidatos da rede obtida mediante a fase 1:

Tabela 4.13 Processo de intensificação I (Fase 2) para o exemplo de 6 barras

Circuito	Número de Circuitos									Configuração Final
	Rede Inicial (Depois da fase 1)	Movimento								
		1	2	3	4	...				
1-2	0	0	0	0	0	0	0	...	0	
1-3	0	0	0	0	0	0	0	...	0	
1-4	0	0	0	0	0	0	0	...	0	
1-5	1	1	1	1	0*	0	0	...	0	
1-6	0	0	0	0	0	0	0	...	0	
2-3	0	0	0	0	0	0	0	...	0	
2-4	0	0	0	0	1*	0	0	...	0	
2-5	0	0	0	0	0	0	1*	...	0	
2-6	3	3	4*	4	4	4	4	...	4	
3-4	0	0	0	0	0	0	0	...	0	
3-5	1	1	1	1	1	0*	0*	...	1	
3-6	1	0*	0*	0	0	0	0	...	0	
4-5	0	0	0	0	0	0	0	...	0	
4-6	2	2	2	1*	1*	2	2	...	2	
5-6	0	0	0	0	0	0	0	...	0	
Corte de Carga (MW)	0,00	43,28	0,00	83,60	X	0,00	83,72	X	...	0,00
Custo da Expansão (\$)	238,00	190,00	220,00	190,00	230,00	200,00	180,00	211,00	...	200,00

O *movimento* na fase 2 consiste de uma troca de circuitos. Para o exemplo, o *movimento* 1 desliga o circuito 3-6, sendo o primeiro circuito segundo o ordem de custo estabelecido, e calcula o subproblema de *operação*, logo, é selecionada a próxima adição mediante o passo III), ficando mais um circuito 2-6, com o qual, obtém-se corte de carga zero, e um custo da expansão menor que o inicial. A rede é atualizada e

testa o próximo circuito. Nos casos onde o circuito selecionado incrementa o custo da expansão, o subproblema de operação não necessita ser resolvido.

A configuração final do exemplo, encontrada mediante o processo de *intensificação I*, corresponde com a solução obtida por Garver[3].

4.5.2. PROCEDIMENTO DE INTENSIFICAÇÃO II

O segundo procedimento de intensificação está baseado no conceito de *oscilação estratégica* incluído na teoria da *BT*. Basicamente, este conceito estabelece a possibilidade de permitir *movimentos* que levem a busca para soluções "piores" que a atual, com o intuito de encontrar rotas alternativas que, eventualmente, permitem encontrar melhores soluções.

No contexto do problema de planejamento, isto significa permitir que a busca local procure configurações viáveis de custo maior que o custo da configuração atual. A Figura 4.10 ilustra o procedimento de *intensificação II*:

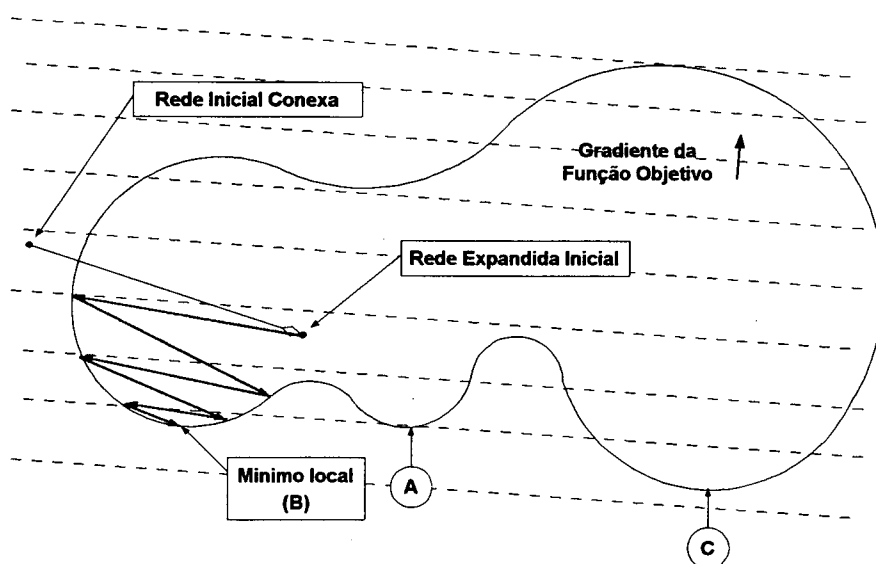


Figura 4.10 Procedimento de intensificação II

Este procedimento está dividido em duas fases. Na primeira, são feitas T trocas de circuitos partindo da rede expandida inicial, permitindo incrementar o custo atual da expansão até uma porcentagem P escolhida, a qual é denominada de *porcentagem de incremento oscilatório*. Depois, é feito um procedimento igual ao da fase 1 na *intensificação I*, com a finalidade de retirar todos os circuitos "ociosos".

Os passos que conformam a fase 1 da *intensificação II* são descritos a seguir:

- I) ordenar os circuitos candidatos ligados à rede de expansão inicial, em uma lista do maior para o de menor custo; Selecione o número de trocas T e a porcentagem P desejados; inicialize o contador de trocas $t=0$;
- II) dessa lista, desligue o circuito de maior custo ainda não testado e solucione o subproblema de *operação*. Se o corte de carga é zero, o circuito fica desligado, e vá para o passo V. Se não, vá para o passo III;
- III) selecione o próximo *movimento* de maneira similar como é feito no processo de expansão ilustrado na Figura 4.5, mas sem utilizar os critérios de susceptância e fluxo; o próximo *movimento* consiste da adição de um ou vários circuitos candidatos, sempre que a soma dos seus custos esteja dentro do limite de incremento limitado pela porcentagem P ;
- IV) calcule o corte de carga considerando todos os circuitos selecionados em III; se o corte é zero, a troca é efetiva, deixando-se ligados os circuitos selecionados em III e desligado o circuito testado em II, faça $t=t+1$. Se a troca não é efetiva, religa-se o circuito testado em II e desligam-se os circuitos selecionados em III;
- V) se $t < T$ e ainda faltam circuitos para serem testados, vá para o passo II; se $t = T$ e ainda faltam circuitos para serem testados execute o procedimento da fase 1 da *intensificação I* para retirar circuitos "ociosos" da rede atual, e vá para o passo II. Se todos os circuitos foram testados, o procedimento termina.

A seguir, é apresentado o resultado do exemplo de 6 barras para a fase 1, do procedimento de intensificação II, utilizando $T=2$ e $P=15\%$.

Tabela 4.14 Processo de intensificação II (Fase 1) para o exemplo de 6 barras

Circuito	Número de Circuitos										
	Resultado da Expansão Inicial	Movimento									Configuração Final
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-5	2	3*	4*	3	2*	2	3*	2	1*	0*	0
1-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-3	1	1	1	1	1	0*	0	0	0	0	0
2-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-6	3	4*	3*	4	4	4	4	4	4	4	4
3-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3-5	1	1	1	1	1	1	0*	2*	1	1	1
3-6	1	0*	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4-6	3	3	3	2*	2	2	2	1*	2	2	2
5-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Corte de Carga (MW)	0,00	0,00	16,65	0,00	0,00	0,00	67,47	81,44	0,00	0,00	0,00
Custo da Expansão (\$)	308,00	310,00	X	280,00	260,00	240,00	X	X	220,00	200,00	200,00
Trocas	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Nesta fase uma troca é caracterizada por duas condições básicas:

- o incremento de custo decorrente da troca esteja dentro do limite de incremento permitido pela porcentagem P e,
- a troca pode ser feita desde que não haja corte de carga.

Na segunda fase o procedimento de trocas consiste da retirada de circuitos "ociosos" de forma alternada, ou seja, primeiro são feitas T trocas de circuitos, para em seguida serem retirados os circuitos "ociosos". Finalmente, realiza-se um novo processo de trocas, e assim sucessivamente até se atingir o critério de parada.

Na continuação, são apresentados os passos que definem a fase 2 deste processo de *intensificação*:

- ordenar os circuitos candidatos ligados na ultima *rede atualizada*, em uma lista do maior para o de menor custo;
- repita os passos II até IV da fase 1;
- se $t < T$ e ainda faltam circuitos por serem testados vá para o passo II; se $t = T$ e ainda faltam circuitos por serem testados, ou se todos os circuitos foram testados e $t \neq 0$, execute o procedimento da fase 1 da *intensificação I* para retirar circuitos "ociosos" da rede atual e vá para o passo I. Se todos os circuitos foram testados e $t = 0$, o procedimento termina.

4.6. PROCESSO DE DIVERSIFICAÇÃO

A *diversificação* é um dos conceitos mais importantes da *BT*, que permite executar uma busca mais agressiva onde o espaço de soluções é ampliado visando encontrar o ótimo global. A idéia é começar a busca novamente desde o início *sem permitir* que alguns dos circuitos que fazem parte da solução atual possam ser escolhidos, ou seja, esses circuitos ficam proibidos de serem utilizados no próximo processo de busca. A Figura 4.11 ilustra este processo:

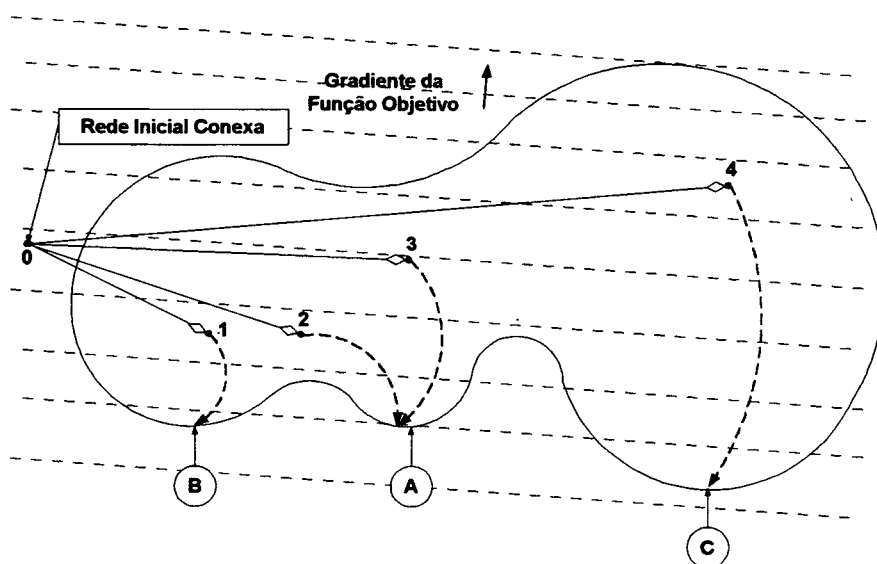


Figura 4.11 Processo de *diversificação*

Da figura anterior, os pontos identificados como 1, 2, 3 e 4 são configurações diferentes, ou seja, "pontos viáveis iniciais" encontrados mediante o *processo de expansão*. Note-se que o ponto de origem é sempre igual, identificado com o número 0, e as trajetórias 1-B, 2-A, 3-A e 4-C representam diferentes processos de *intensificação*, que conseguem encontrar os pontos mínimos locais A, B e C. A solução do problema é o ponto com o menor valor de custo da expansão.

Este processo utiliza um vetor de *frequência da diversificação* e lista tabu próprios que conformam o que se poderia chamar de *memória de longo prazo*, com a qual consegue-se procurar outras soluções ótimas locais. A configuração final, ou resultado definitivo do algoritmo, será aquela configuração de menor custo até então encontrada.

A seguir são explicados os conceitos que determinam o vetor de *frequência da diversificação* e *lista tabu* correspondentes deste processo.

4.6.1. FREQUÊNCIA DE DIVERSIFICAÇÃO

Até agora, os processos de *expansão* e *intensificação* conseguem encontrar um conjunto de soluções ótimas do problema, porém não se pode afirmar se o ótimo global está contido nesse conjunto. Para se obter um melhor grau de confiança acerca das soluções encontradas até então, é necessário ampliar o espaço de busca. Para tanto, o processo de busca é reinicializado, mas, impedindo, de algum modo, que a solução atual seja repetida. Assim, utiliza-se o vetor de *frequência da diversificação* que forçará o algoritmo a encontrar outras configurações.

O objetivo do vetor de *frequência de diversificação*, é detectar quais são os circuitos da **solução atual** que possuem alta frequência, ou seja, que tendem a aparecer sempre em diferentes soluções, para depois, definir estes circuitos frequentes como candidatos "proibidos" para novos processos de busca.

Para detectar os circuitos mais frequentes, é utilizada a informação proveniente do vetor de *frequência de diversificação*, o qual é formado mediante um procedimento simples: soma o valor de cada elemento do vetor de *frequência da expansão* com o número de circuitos que foram incluídos na solução atual para esse elemento.

Por exemplo, seja um problema com 5 circuitos candidatos cuja *frequência da expansão* do processo de busca atual é dada pelo vetor $Freq_{exp} = (8, 3, 1, 0, 1)$, e cuja solução depois dos processos de *expansão inicial* e *intensificação* é $soluc = (0, 1, 1, 2, 0)$, sendo que cada valor deste último vetor, corresponde ao número de circuitos utilizado na solução. Assim, o vetor de *frequência de diversificação* será $Freq_{div} = (0, 4, 2, 2, 0)$.

Caso um circuito não seja incluído na solução atual, seu valor de $Freq_{div}$ será zero ainda que tenha alta *frequência de expansão*, pois a idéia é considerar a frequência apenas dos circuitos que não foram retirados pelo processo de *intensificação*, como no exemplo, para os circuitos 1 e 5. Isto evita informações incorretas de circuitos que podem parecer de alta frequência mas que são eliminados na *intensificação*.

Para o caso de 6 barras o vetor de *frequência da diversificação* é calculado segundo apresenta-se na Tabela 4.15

Tabela 4.15 Cálculo do vetor de *freqüência da diversificação*

Circuito	Freqüência da Expansão	Configuração resultante (Depois da Int.I e II)	Freqüência de Diversificação
1-2	-	0	0
1-3	-	0	0
1-4	-	0	0
1-5	7	0	0
1-6	-	0	0
2-3	3	0	0
2-4	-	0	0
2-5	-	0	0
2-6	9	4	13
3-4	-	0	0
3-5	3	1	4
3-6	3	0	0
4-5	-	0	0
4-6	8	2	10
5-6	-	0	0

4.6.2. LISTA TABU DE DIVERSIFICAÇÃO

Neste processo, a *lista tabu* serve para evitar a "ciclagem" na escolha dos circuitos que serão proibidos para a próxima busca, e permite escolher outros circuitos que não foram considerados antes.

Para explicar melhor esta definição, é apresentado o procedimento que permite determinar duas configurações diferentes, utilizando o conceito de *lista tabu* na *diversificação*.

- I) encontrar uma solução, ou configuração ótima, começando pela rede inicial conexa, utilizando os processos de *expansão* e *intensificação* vistos anteriormente;
- II) faça L =número de circuitos que serão proibidos na próxima busca, K =número de configurações onde um circuito não pode ser indicado como proibido, $LISTABU(i)=0$ para todo circuito candidato i ligado na rede obtida em I;
- III) da informação obtida de I, seleciona-se os L circuitos candidatos de maior *freqüência da diversificação* sempre que $LISTABU(l)=0$ para todo $l \in L$;
- IV) atualize o vetor $LISTABU$ para todos os circuitos i , da seguinte maneira: Se $i \in L$, $LISTABU(i)=K$, se não $LISTABU(i)=LISTABU(i)-1$, se $LISTABU(i)<0$ faça $LISTABU(i)=0$;
- V) verifique para todo circuito candidato i : se $LISTABU(i)=0$ o circuito é um candidato disponível, se não é proibido;

VI) recomençar novamente a busca, desde o processo de *expansão*, sem incluir os circuitos candidatos proibidos. Termina o procedimento.

Note-se, que no passo V, deve existir um algoritmo que evite o isolamento da rede, e nesse caso, impedir que sejam proibidos circuitos "indispensáveis".

Ao final, no passo VI, é obtida outra configuração ou solução viável, cujo custo pode ser comparado com o obtido em I. A rede de menor custo da expansão é considerada como a solução mínima atual.

A Tabela 4.16 ilustra o processo de *diversificação* para três configurações adicionais à primeira solução do caso de 6 barras, considerando $L=1$ e $K=3$

Tabela 4.16 Processo de diversificação

Circuito	Circuitos da Solução Atual (inicial)	Frequência de Diversificação (inicial)	Configuração 1				Configuração 2				Configuração 3			
			Circuitos Proibidos	Indicador Tabu	Circuitos da Solução Atual	Frequência de Diversificação	Circuitos Proibidos	Indicador Tabu	Circuitos da Solução Atual	Frequência de Diversificação	Circuitos Proibidos	Indicador Tabu	Circuitos da Solução Atual	Frequência de Diversificação
1-2	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
1-3	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
1-4	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
1-5	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
1-6	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
2-3	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
2-4	0	0		0	1	4		0	1	4		0	0	0
2-5	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
2-6	4	14	2-6	3	0	0		2	4	17		1	4	4
3-4	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
3-5	1	4		0	2	11		0	2	13	3-5	3	0	0
3-6	0	0		0	2	8		0	3	10		0	0	0
4-5	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
4-6	2	10		0	4	17	4-6	3	0	0		2	2	2
5-6	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
Custo da Expansão (\$)	200,00				296,00				344,00				273,00	

O vetor de *frequência de diversificação* é calculado desde zero cada vez que é realizado um novo processo de busca.

Da tabela anterior, pode-se observar que foram encontradas configurações de maior custo que a solução inicial. Assim, a solução definitiva corresponde à primeira rede encontrada, ou seja, o processo de diversificação confirmou que a primeira solução encontrada é o ótimo global.

4.7. CRITÉRIO DE PARADA E RESULTADO FINAL

O critério de parada do algoritmo, está baseado no número de processos de diversificação D que são executados. Teoricamente, um valor alto para D , asseguraria que a solução encontrada é de fato um ótimo local de boa qualidade e, conseqüentemente, possa ser o mínimo global do problema.

No entanto, não é possível afirmar categoricamente que o mínimo local encontrado é mínimo global, já que esta metodologia, como quase todas as outras metaheurísticas, não possui uma estrutura matemática definida que permita demonstrar a convergência para o mínimo global do problema.

Para finalizar, é apresentada a Figura 4.12 onde ilustra-se o comportamento do processo de diversificação para $D=4$, $L=1$ e $K=3$:

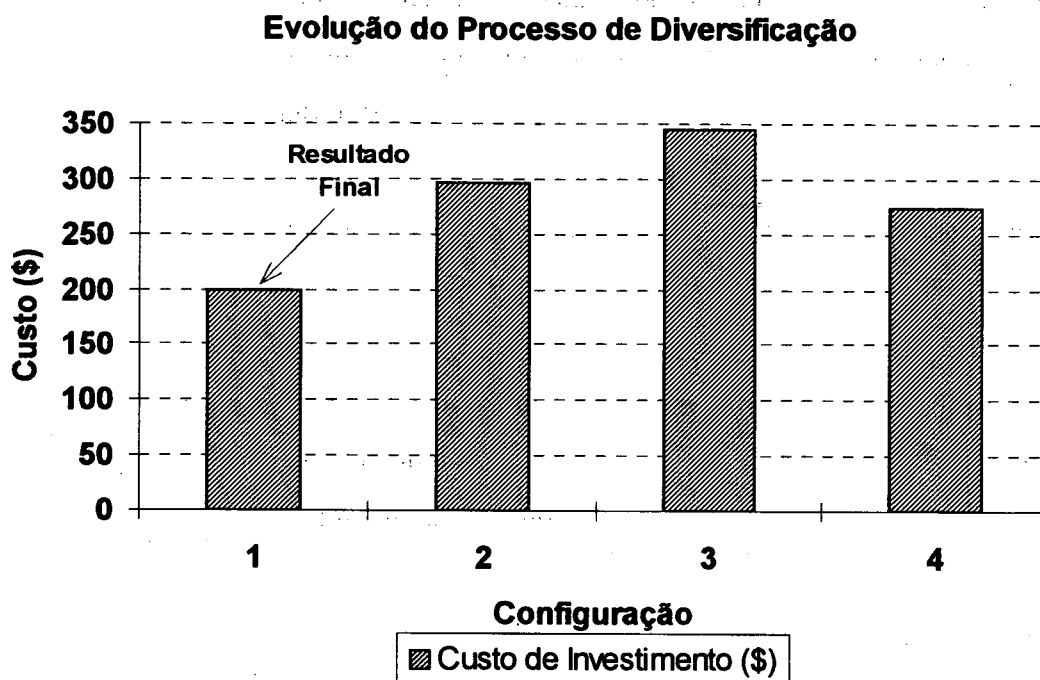


Figura 4.12 Resultado final do caso teste para 4 processos de diversificação

O resultado final corresponde à rede encontrada na primeira configuração, com custo da expansão igual a \$200.00, cuja configuração é ilustrada na Figura 4.13

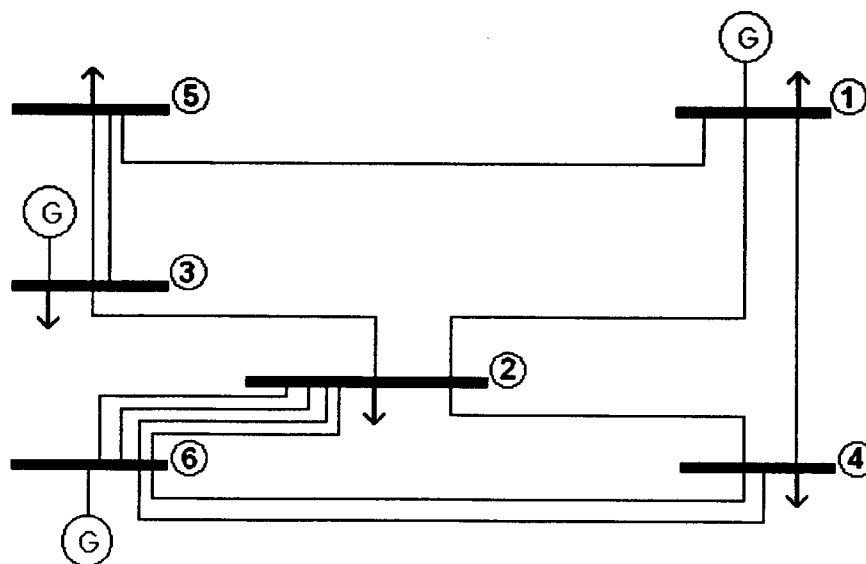


Figura 4.13 Solução para o caso teste

4.8. PARÂMETROS DE ENTRADA E FLUXOGRAMA

A seguir são apresentados todos os parâmetros utilizados nos diferentes processos e procedimentos da metodologia, bem como o fluxograma do módulo computacional desenvolvido.

Parâmetros utilizados no processo de expansão inicial:

- *C*: número de configurações de expansão desejado;
- *N*: tamanho da lista de candidatos analisados para escolher o próximo *movimento* de adição;
- *J*: número de *movimentos* de expansão que um circuito candidato fica como movimento tabu;
- *M*: número de circuitos candidatos de maior *frequência* que serão utilizados no processo de *expansão inicial*.

Parâmetros utilizados no processo de intensificação II:

- *P*: porcentagem de incremento oscilatório;
- *T*: número máximo de trocas permitidas.

Parâmetros utilizados no processo de diversificação:

- *D*: número de processos de diversificação que serão executados;
- *K*: número de configurações que um circuito candidato fica como movimento proibido;
- *L*: número de circuitos proibidos para cada busca no processo de *diversificação*.

Todos estes dados são como parâmetros fixos, ou podem ser introduzidos pelo usuário. Não existe um critério de ajuste definido para eles, podendo ser escolhidos empiricamente, sem que isto cause maiores inconvenientes para a obtenção da solução. No próximo capítulo será analisada a influência destes parâmetros no resultado final do problema.

O fluxograma do algoritmo é ilustrado a seguir na Figura 4.14

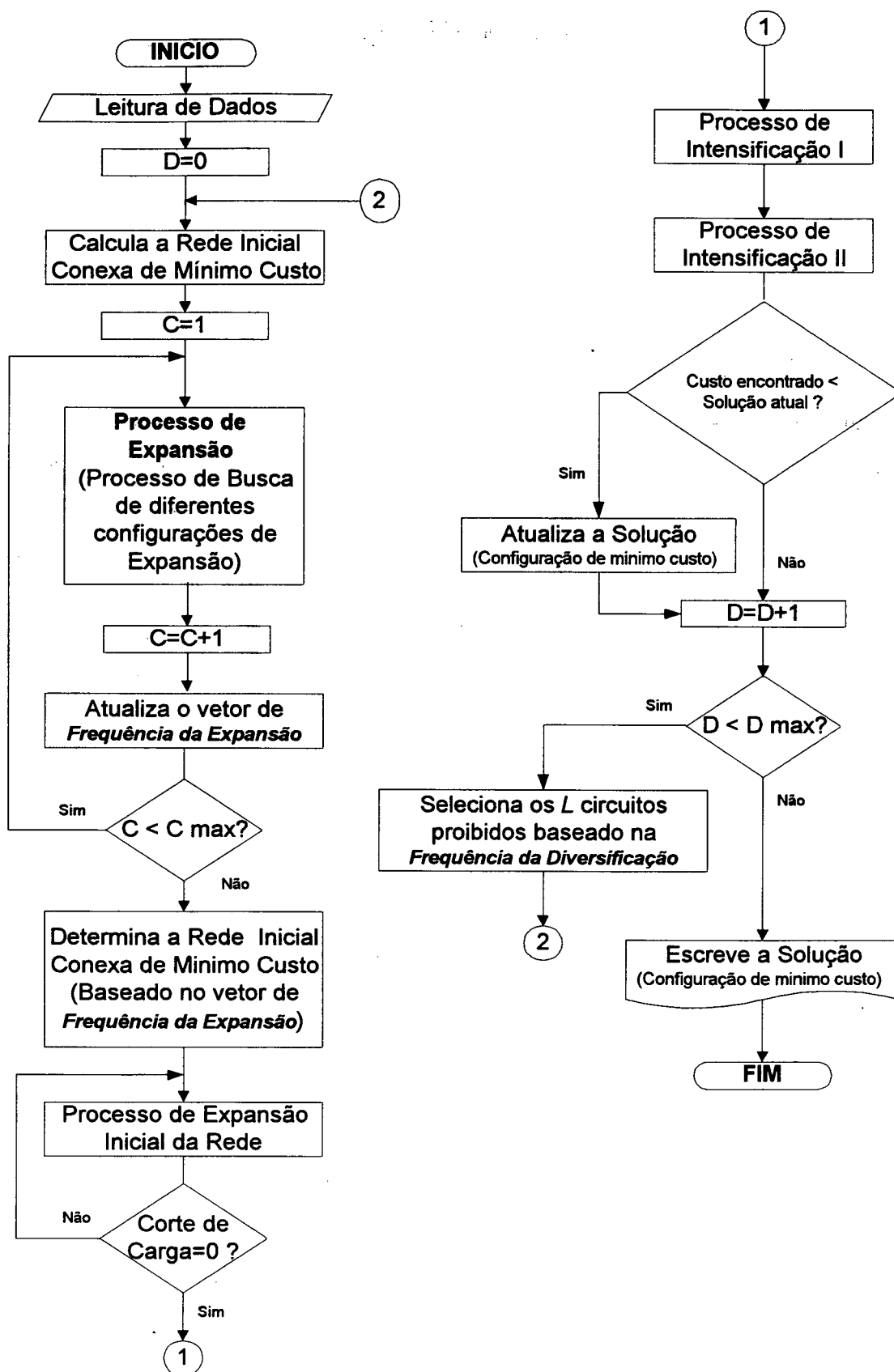


Figura 4.14 Fluxograma do Algoritmo de Busca Tabu Aplicada ao Planejamento da Expansão da Transmissão

4.9. CONCLUSÕES

- A modelagem proposta para o problema, utilizando uma decomposição em dois subproblemas, um de *investimento* e outro de *operação*, é adequada já que permite obter soluções coerentes com às necessidades do planejamento de longo prazo.
- Na *BT* aplicada ao planejamento da transmissão, a definição de *movimento* consiste da *adição*, *troca* ou *remoção* de circuitos. Dependendo do processo, a definição do *movimento* utilizado é alterada.
- Antes de se aplicar um *movimento*, são utilizados *critérios* que ajudam decidir qual será o circuito mais indicado a sofrer movimento. O critério mais importante está baseado no *fator de sensibilidade*, que define o grupo dos N circuitos candidatos, dos quais será selecionado o próximo *movimento*.
- A decisão de escolha de um circuito, está definido de forma geral pelos seguintes critérios:
 1. *Critério baseado no Fator de Sensibilidade*: Pode ser entendido como uma medida "global" da conveniência da entrada de um circuito para redução do corte de carga.
 2. *Custo do circuito*: É uma medida da conveniência econômica de adicionar ou retirar um circuito.
 3. *Susceptância do circuito*: Dá uma idéia da conveniência "técnica" da entrada do elemento reforçando a conectividade da rede.
 4. *Fluxo através do circuito*: É um critério adicional criado para ajudar na determinação da entrada de circuitos paralelos.

- A *lista tabu* no processo da *expansão* serve como *memória de curto prazo*, com a finalidade de evitar a ciclagem de soluções. Implicitamente, a *lista tabu* orienta a busca para procurar *movimentos* que não levem o problema para soluções visitadas anteriormente.
- O *critério de aspiração* é utilizado para definir regras que permitam a conexão de circuitos paralelos.
- A *frequência da expansão* serve como *memória de médio prazo* para identificar os circuitos mais frequentes nas diferentes configurações encontradas no processo de *expansão* inicial.
- A *intensificação*, é o processo que permite "depurar" a rede inicial obtida do processo de *expansão*, e determinar uma rede de mínimo custo que seja solução local do problema.
- A *diversificação*, é um processo que serve para procurar várias soluções mínimas locais no espaço de soluções, e tentar encontrar o mínimo global do problema, utilizando um vetor *de frequência da diversificação* e *lista tabu* próprios, formando o que se poderia chamar de *memória de longo prazo*.
- Os conceitos da metodologia de *Busca Tabu*, são facilmente aplicáveis ao problema de planejamento da *expansão* da transmissão de longo prazo, requerendo a implementação computacional de um algoritmo adequado de solução do subproblema de *operação* ou fluxo de potência ótimo DC. Adicionalmente, requer de subrotinas que avaliem corretamente os diferentes critérios utilizados nos processos de *expansão*, *intensificação* e *diversificação* da busca.

- As potencialidades da metodologia não limitam a sua aplicação ao problema de planejamento da transmissão. Assim, utiliza-se a sua aplicação em outros problemas inteiro-misto e não convexos tipo programação de desligamentos e "*unit commitment*".

CAPÍTULO 5

RESULTADOS DA METODOLOGIA APLICADA A PROBLEMAS DE GRANDE PORTE

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é analisado o comportamento do programa computacional desenvolvido com base nos processos de busca definidos no capítulo 4. Inicialmente são apresentados os sistemas teste utilizados e os parâmetros de busca *padrão* do programa, com os quais foram encontradas as melhores soluções. Na sequência é analisada a influência dos diferentes parâmetros na qualidade da solução final e, em seguida, são apresentadas regras práticas para o ajuste destes parâmetros na solução de sistemas de grande porte. Por último são enunciadas as conclusões.

5.2. CASOS TESTE ANALISADOS

Para este trabalho foram utilizados dois sistemas teste, um de 46 e o outro de 79 barras, os quais são descritos a seguir.

Para estes sistemas o objetivo é a determinação da rede de mínimo custo que atende ao mercado previsto para o ano horizonte.

5.2.1. SISTEMA SUL BRASILEIRO REDUZIDO (SU46)

Este sistema possui 46 barras e corresponde a uma configuração da malha principal do sistema sul Brasileiro, cujos dados podem ser encontrados no apêndice C. A rede que ilustra este sistema é apresentada na Figura 5.1

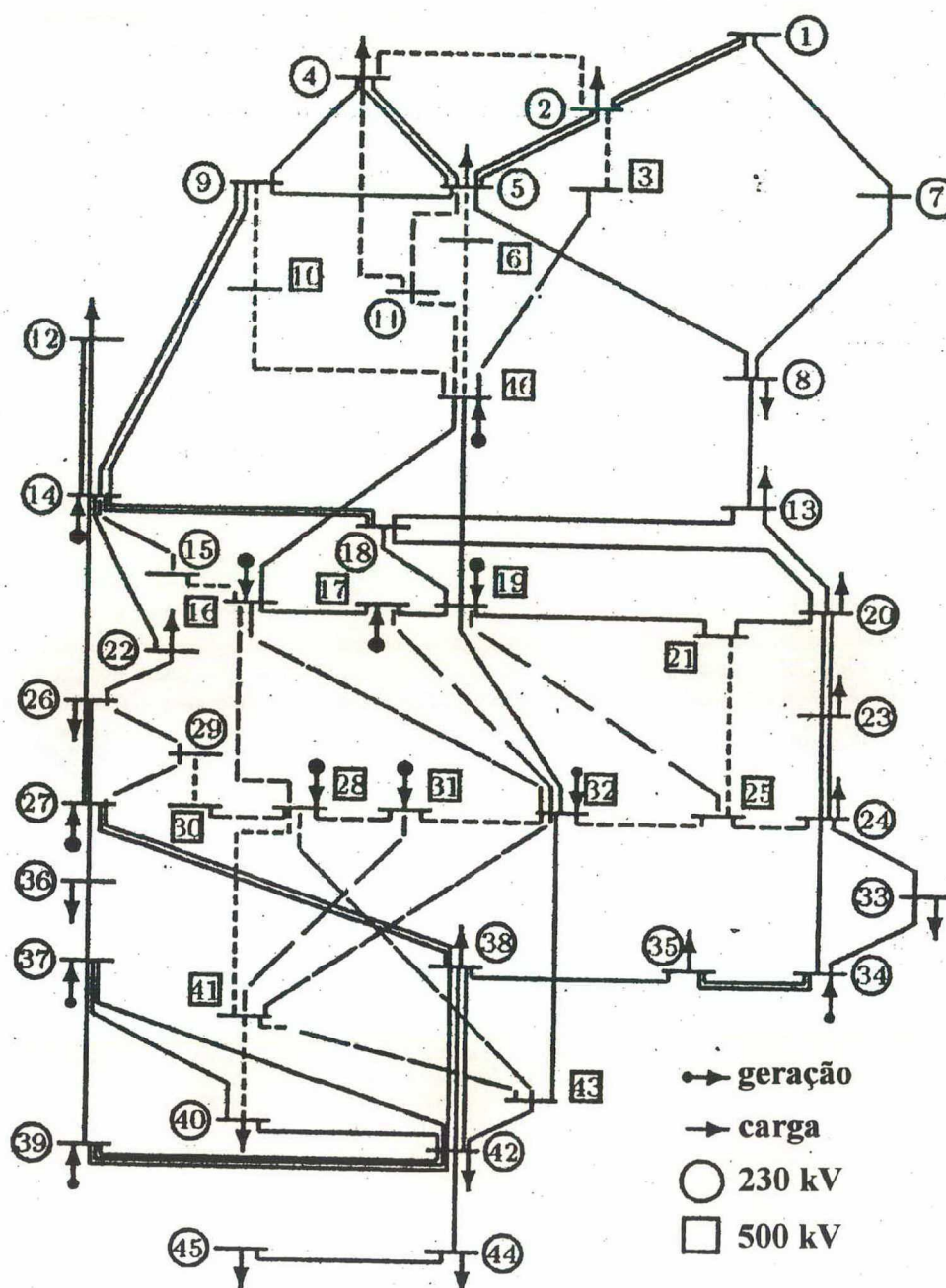


Figura 5.1 Sistema Sul Reduzido-SU46

5.2.2. SISTEMA SUDESTE BRASILEIRO (SE79)

Este sistema possui 79 barras e 155 circuitos e corresponde a uma configuração da malha principal do sistema sudeste. Os dados deste sistema encontram-se no apêndice C.

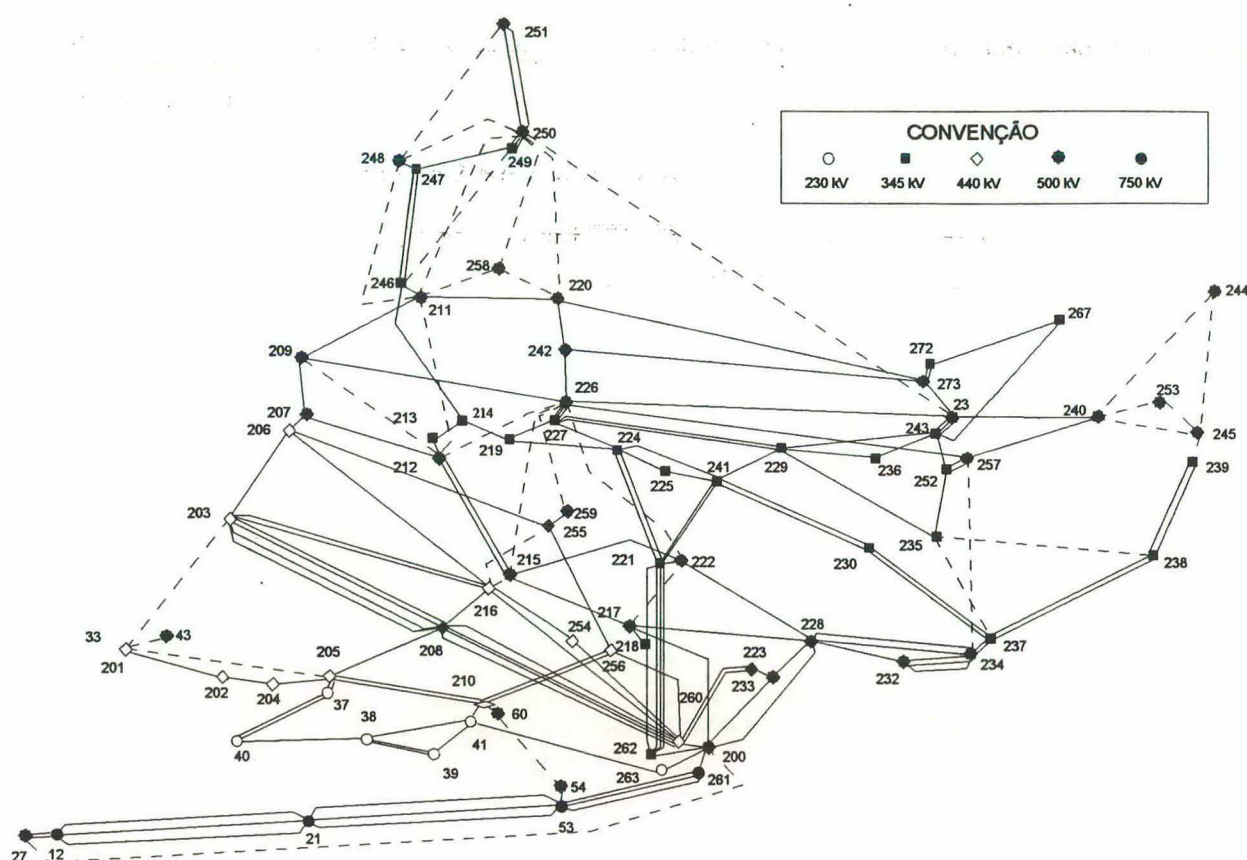


Figura 5.2 Sistema Sudeste-SE79

5.3. PARÂMETROS DE BUSCA E A SUA INFLUÊNCIA NA SOLUÇÃO DO PROBLEMA

Para o cálculo da solução final do problema, o modelo computacional requer uma série de parâmetros de entrada que *definem* o processo de busca. É importante analisar a influência que estes parâmetros têm sobre a qualidade da solução encontrada.

A seguir será apresentado o conjunto de parâmetros que pode ser utilizado para orientar qualquer processo de busca, os quais foram denominados de parâmetros *padrão*. Depois será analisada a sensibilidade do algoritmo frente a esses parâmetros, testando-se sua influência na qualidade da solução final, para o qual é analisada a sensibilidade com respeito a:

- ◆ o tipo de rede conexa inicial;
- ◆ o tipo de expansão utilizada;
- ◆ tamanho da lista de candidatos analisados para escolher o próximo movimento;

- ◆ tamanho da lista tabu de expansão;
- ◆ tamanho do vetor de frequência da expansão;
- ◆ número máximo de trocas permitidas;
- ◆ porcentagem de incremento oscilatório;
- ◆ número de processos de diversificação;
- ◆ tamanho da lista tabu de diversificação;
- ◆ número de circuitos proibidos na diversificação.

É importante salientar que todas as sensibilidades serão analisadas tendo-se como referência o conjunto de parâmetros *padrão*.

5.3.1. PARÂMETROS *PADRÃO*

Com a finalidade de orientar corretamente o processo de busca e permitir uma expansão automática da rede, foi necessário identificar um conjunto de parâmetros de entrada que servissem para "qualquer" rede. Os elementos deste conjunto são chamados de parâmetros *padrão*.

Estes parâmetros foram encontrados experimentalmente e demonstraram um comportamento satisfatório na solução dos casos teste analisados, e podem servir como ponto de partida para solucionar qualquer problema.

As definições dos parâmetros utilizados são bastante simples requerendo do usuário apenas uma idéia geral do processo de busca. Neste trabalho foram utilizados os seguintes parâmetros:

Parâmetros utilizados no processo de expansão:

- tipo de rede conexa inicial: *radial*;
- número de configurações desejada no processo de expansão inicial:
 $C=24$;
- tamanho da lista de candidatos para escolher o próximo movimento de adição: $N=10$;
- número de iterações de expansão que um circuito candidato fica como movimento tabu, chamado indicador da lista tabu de expansão: $J=2$;
- número de circuitos candidatos de maior frequência que serão utilizados no processo de expansão final, $M=20\%$ do total dos candidatos;

Parâmetros utilizados no processo de intensificação II:

- porcentagem de incremento oscilatório: $P=15\%$;
- número máximo de trocas permitidas: $T=2$;

Parâmetros utilizados no processo de diversificação:

- número de configurações ou soluções que serão procuradas pelo modelo: $D=10$;
- número de configurações que um circuito candidato não pode ser escolhido como movimento proibido, $K=2$;
- número de circuitos candidatos proibidos para cada busca no processo de diversificação, $L=1$;

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os sistemas de teste utilizando os parâmetros *padrão* adotados.

Para processar o algoritmo foi utilizado um microcomputador Intel, com processador 80486 DX4-S, 100 MHz, 24 Mbytes de memória RAM e 256K bytes de memória cache. O programa computacional foi desenvolvido em Fortran Lahey (versão C, 1992).

5.3.1.1. Resultados para o caso do sistema SU46

A solução final do problema é uma rede cujo custo é de 154,26 Unidades Monetárias (u.m.) onde os reforços adicionais necessários são apresentados na Tabela 5.1. A configuração obtida coincide com a melhor solução conhecida para este caso [1,6].

Tabela 5.1 Resultados para o caso SU46

BARRA DE INICIO	BARRA DE CHEGADA	REAT (%)	CAP. (MW)	No. CTOS	FLUXO (MW)	CUSTO (\$)
26	29	5,41	272	3	243	11,68
19	25	3,25	1413	1	952	37,75
46	6	1,28	2019	1	931	16,01
31	32	0,46	2019	1	310	7,05
28	30	0,58	2019	1	730	8,33
20	21	1,25	605	1	542	8,16
42	43	1,25	605	2	450	16,32
24	25	1,25	605	2	476	16,32
29	30	1,25	605	2	365	16,32
5	6	1,25	605	2	465	16,32
CUSTO TOTAL DA EXPANSÃO						154,26

O processo de diversificação é ilustrado na Figura 5.3. O tempo necessário para processar as 10 configurações foi de 8,4 minutos.

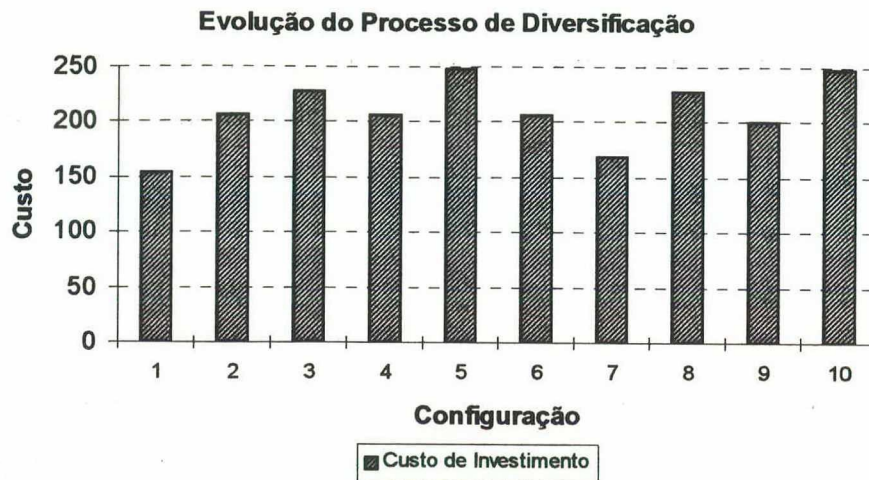


Figura 5.3 Processo de diversificação para o caso SU46

O processo de busca para a configuração mais econômica encontrada apresenta-se na Figura 5.4

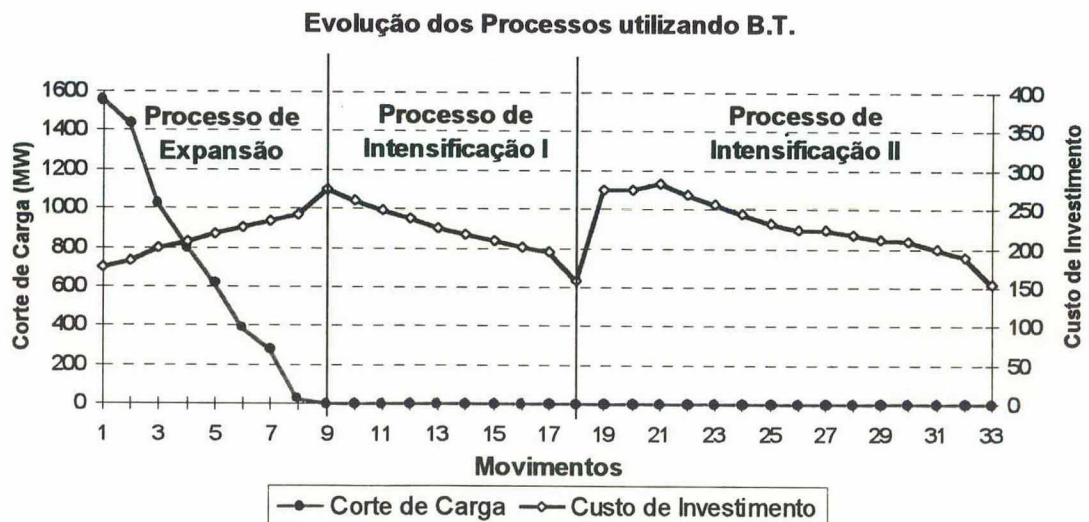


Figura 5.4 Processo de busca para a primeira configuração do caso SU46

5.3.1.2. Resultados para o caso do sistema SE79

Para este caso foi considerada a adição máxima de três circuitos em paralelo por faixa de passagem, o resultado obtido foi uma rede com um custo de 444,49 u.m. e cujos circuitos selecionados estão na Tabela 5.2. A configuração final en-

contrada com esta metodologia constitui-se na melhor solução reportada para este caso até presente data [7].

Tabela 5.2 Resultados para o caso SE79

BARRA DE INICIO	BARRA DE CHEGADA	REAT (%)	CAP. (MW)	No. CTOS	FLUXO (MW)	CUSTO (\$)
212	215	3,10	1211	1	1101	37,07
250	251	2,40	1312	1	932	56,70
220	242	1,30	1211	1	822	17,39
226	242	1,50	1211	1	976	19,43
215	217	2,60	1211	1	1159	30,81
248	250	1,90	1211	1	1211	22,39
244	245	7,50	1211	1	317	89,55
245	253	1,50	1211	1	499	17,91
211	212	3,20	1211	2	951	77,02
226	259	2,30	1211	1	719	26,86
245	239	2,10	565	2	408	10,00
207	206	1,30	757	1	558	6,10
249	250	2,14	565	1	425	5,00
234	237	2,10	565	1	422	5,00
210	41	6,70	151	2	140	7,16
248	247	2,10	565	2	403	10,00
255	259	1,30	757	1	719	6,10
CUSTO TOTAL DA EXPANSÃO						444,49

O processo de diversificação é ilustrado na Figura 5.5. Para essa expansão, o tempo de processamento para calcular as 10 configurações de diversificação foi de 46 minutos.

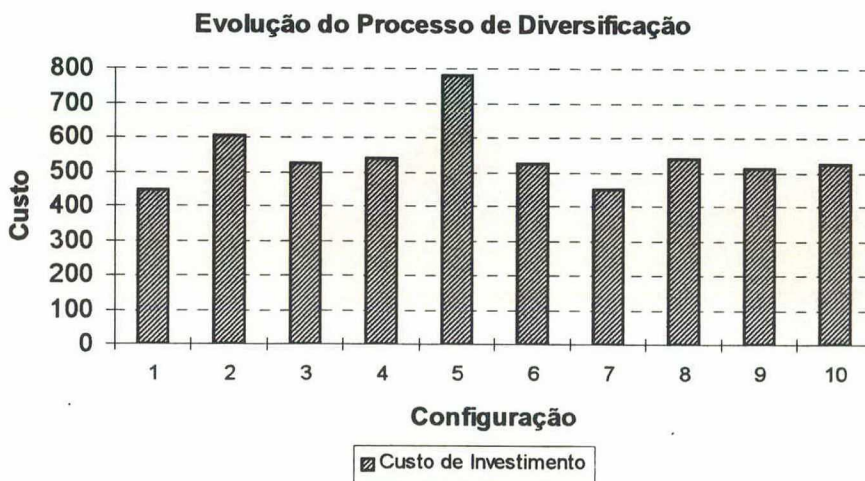


Figura 5.5 Processo de diversificação para o caso SE79

A exemplo da aplicação anterior, a primeira configuração encontrada corresponde à de menor custo. Esta característica será tratada no final do capítulo. O processo de busca para a primeira configuração apresenta-se na Figura 5.6

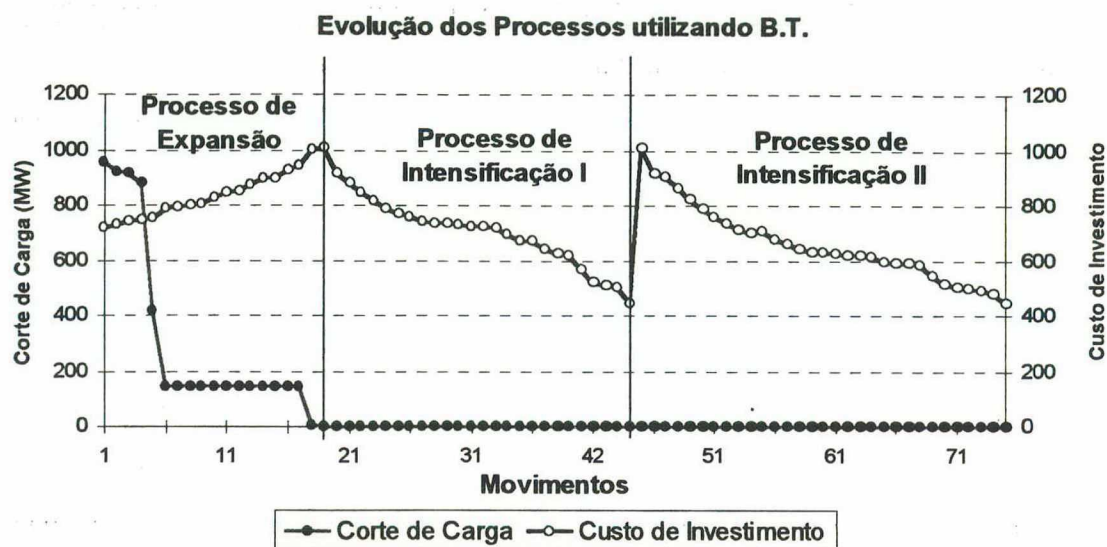


Figura 5.6 Processo de busca para a primeira configuração do caso SE79

5.3.2. SENSIBILIDADE AO TIPO DE REDE INICIAL

Como foi descrito no capítulo anterior, o modelo inicia calculando uma rede conexa inicial que liga todas as barras novas à rede existente, com base em considerações de mínimo custo. Esta rede pode ter barras novas ligadas radialmente ou, no mínimo, mediante dois novos circuitos, sendo esta condição abandonada depois de calcular a rede conexa inicial. A sensibilidade com respeito ao tipo de rede inicial para os casos teste é ilustrado na Figura 5.7

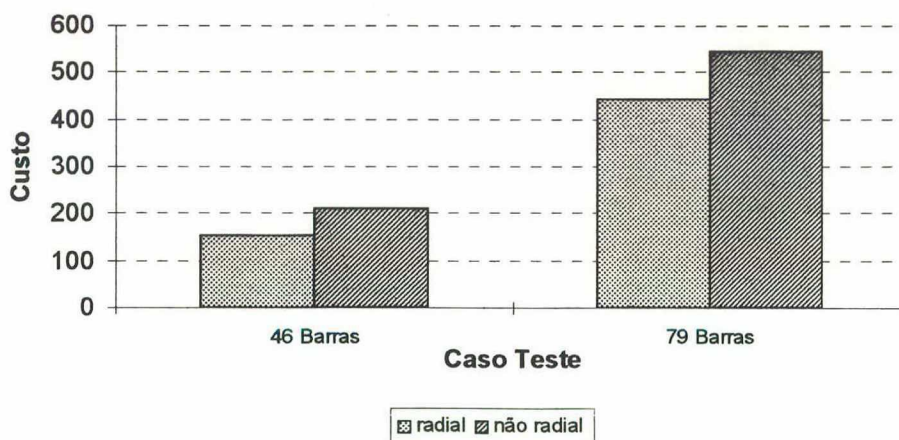


Figura 5.7 Sensibilidade ao tipo de rede conexa inicial

Para ambos os sistemas de teste, a melhor solução corresponde ao caso no qual é utilizada uma rede conexa inicial radial. Esta característica pode ser justificada

pelo fato de que uma rede inicial não radial, ao ser expandida apresenta muitas folgas de transmissão, dificultando o processo de *intensificação* e diminuindo a eficiência do algoritmo.

Daqui para frente, dada a melhor eficiência da expansão que considera inicialmente circuitos radiais, toda análise restante será efetuada com base nesta premissa.

5.3.3. SENSIBILIDADE AO TIPO DE EXPANSÃO UTILIZADO (C)

O algoritmo permite fazer dois tipos de expansões diferentes. No primeiro é utilizado um procedimento denominado P1, onde cada *movimento* ou adição de circuitos, é feito usando um circuito por vez.

No segundo procedimento, chamado P2, é permitido que cada *movimento*, contenha a adição de mais de um circuito candidato.

A seguir, na Figura 5.8 aparecem os resultados da busca utilizando os procedimentos de expansão P1 e P2, onde foram geradas C configurações. Note-se que a adição por grupos de NC circuitos no procedimento P2 depende diretamente do número de configurações C desejado, conforme foi descrito no Capítulo anterior.

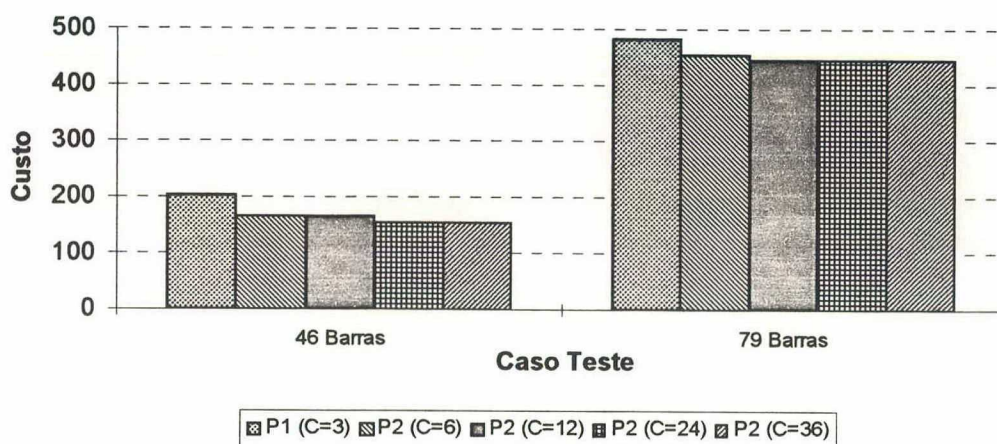


Figura 5.8 Sensibilidade ao tipo de expansão utilizado

Para todos os casos pode-se observar que é preferível a expansão do tipo P2, ou seja, é melhor realizar a expansão utilizando grupos de circuitos do que de um circuito por vez.

Tal característica pode ser explicada devido ao *fator de sensibilidade* ser um ótimo indicador nos primeiros estágios do processo de expansão, e não tanto assim

quando a rede já está muito expandida. Isto é, nos primeiros estágios, a adição de um circuito, causa maior *impacto* na redução do corte de carga que nos estágios finais.

Por exemplo, no caso de se ter uma rede expandida com corte de carga baixo, os *fatores de sensibilidade* podem indicar como adequado, um circuito que por si só, não resolve o corte de carga, fazendo com que o algoritmo tenha que incluir maior quantidade de circuitos de pouco *impacto*, até conseguir fazer desaparecer o corte de carga. Este comportamento pode levar a busca para soluções ótimas locais de pouca qualidade.

Assim, o efeito de incluir vários circuitos agrupados nos primeiros estágios da expansão, torna o processo mais eficiente, permitindo que o algoritmo consiga encontrar as melhores soluções para ambos os sistemas analisados.

5.3.4. SENSIBILIDADE AO TAMANHO DA LISTA DE CANDIDATOS ANALISADOS (N)

Antes de escolher quais os circuitos que serão adicionados em cada movimento do processo de expansão, são *analisados* N circuitos do total de candidatos disponíveis. Este parâmetro serve como "filtro" de entrada dos critérios de escolha, permitindo que o algoritmo analise somente circuitos com alto *fator de sensibilidade*. O resultado obtido para a sensibilidade deste parâmetro é ilustrado na Figura 5.9

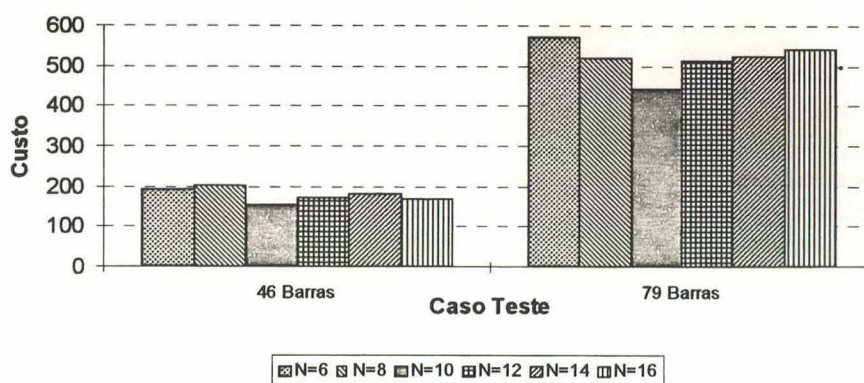


Figura 5.9 Sensibilidade ao tamanho da lista de candidatos analisados

Os resultados mostram que este parâmetro é bastante determinante da qualidade da solução final obtida, assim para $N=10$ foi encontrada a rede de menor custo para ambos os sistemas. Este comportamento mostra que um número N pequeno limita as possibilidades de escolha, fazendo com que não sejam avaliados circuitos que poderiam levar a melhores soluções. Por outro lado, valores elevados de N também não são

recomendáveis, pois nos últimos estágios de expansão da rede o *fator de sensibilidade* pode indicar a inclusão de circuitos que conduzem o problema para ótimos locais de pouca qualidade.

5.3.5. SENSIBILIDADE AO VALOR DO INDICADOR DA LISTA TABU DE EXPANSÃO (J)

A *LT* de expansão serve como *memória de curto prazo* com a finalidade de evitar o retorno para soluções visitadas anteriormente. Para este problema específico, isto significa evitar soluções ótimas locais causadas por *ciclagem*, ou seja, o modulo executa conexões sucessivas de circuitos paralelos. A característica da análise de sensibilidade para este parâmetro aparece na Figura 5.10

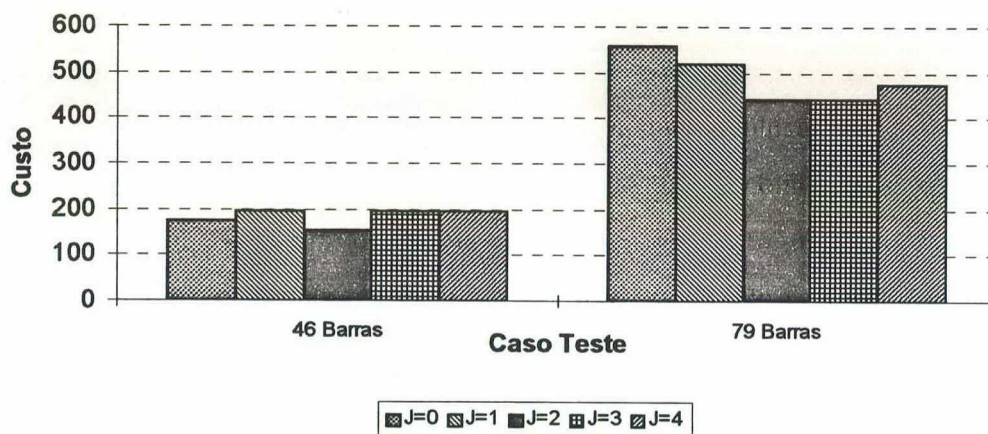


Figura 5.10 Sensibilidade ao indicador da lista tabu de expansão

O comportamento para os dois sistemas mostra que um valor de J nulo não leva às melhores soluções, o qual confirma a necessidade de se ter uma lista tabu de curto prazo que ajude na orientação da busca. O valor mais adequado corresponde a $J=2$, confirmando a teoria de que não são convenientes valores de J baixos, nem muito altos. assim, $J=0,1$ podem ser considerados valores baixos, enquanto $J=3,4$ são considerados valores altos. Nos valores de J baixos ocorre *ciclagem* no processo de busca fazendo incluir circuitos paralelos em excesso. Por outro lado, para valores altos limita-se em demasia a busca, impedindo a inclusão de circuitos úteis na redução do corte de carga por serem considerados *tabu*, deste modo o algoritmo acaba incluindo outros circuitos menos atrativos.

5.3.6. SENSIBILIDADE AO TAMANHO DO VETOR DE FREQUÊNCIA DA EXPANSÃO (M)

O vetor de *frequência da expansão* ajuda a determinar a rede conexa inicial que inclui os M circuitos mais frequentes nas diferentes configurações de expansão encontradas, permitindo deste modo começar o processo de *expansão inicial*. Neste último, o objetivo é a determinação de uma solução viável perto de um ótimo local de boa qualidade. A *expansão inicial* é o processo que antecede à *intensificação* e, quanto melhor for essa expansão, melhor será a qualidade da solução encontrada. Os resultados obtidos para esta sensibilidade são ilustrados na Figura 5.11

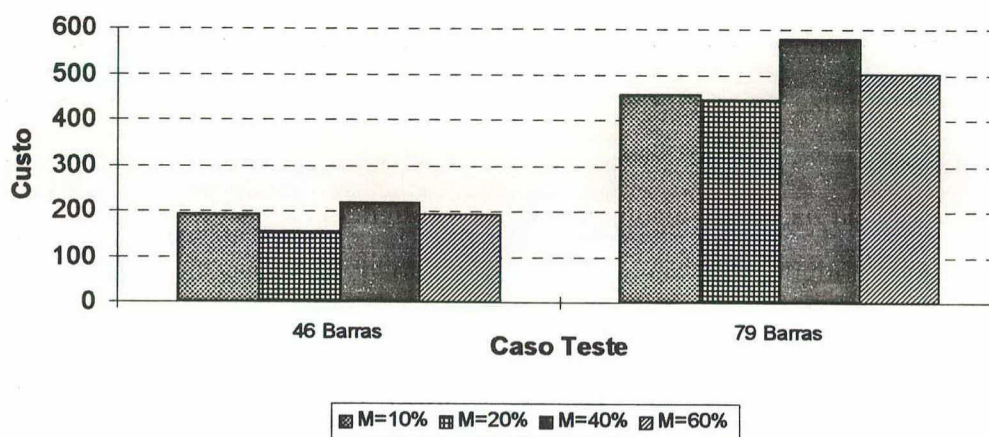


Figura 5.11 Sensibilidade ao tamanho do vetor de *frequência da expansão*

Pode-se observar, que é conveniente começar o processo de *expansão inicial* com um número *moderado* de linhas de alta frequência. Se M é baixo, perde-se informação do vetor de *frequência da expansão*, prejudicando a eficiência do processo de *expansão inicial*. Por outro lado, um número de M elevado ocasiona que a rede inicial conexa para o processo de *expansão inicial* fique demasiado malhada, e consequentemente, vindo a prejudicar o processo de *intensificação*, que no caso partirá de um "ponto viável inicial" longe de um bom ótimo local. O comportamento observado para ambos os sistemas de teste é similar, e os custos da expansão ótimos foram encontrados com $M=20\%$.

5.3.7. SENSIBILIDADE À PORCENTAGEM DE INCREMENTO OSCILATÓRIO (P)

Este parâmetro é utilizado no processo de *intensificação II*, o qual possui um comportamento *oscilatório*, permitindo trocas de circuitos que podem "expandir" a rede, incrementando seu custo atual, e logo, a "comprime" retirando os circuitos "ociosos".

O valor de P , dado em porcentagem, é o limite permitido no incremento de custo em cada "expansão". No capítulo anterior, foram apresentados detalhes deste processo. Os resultados desta análise de sensibilidade aparecem na Figura 5.12.

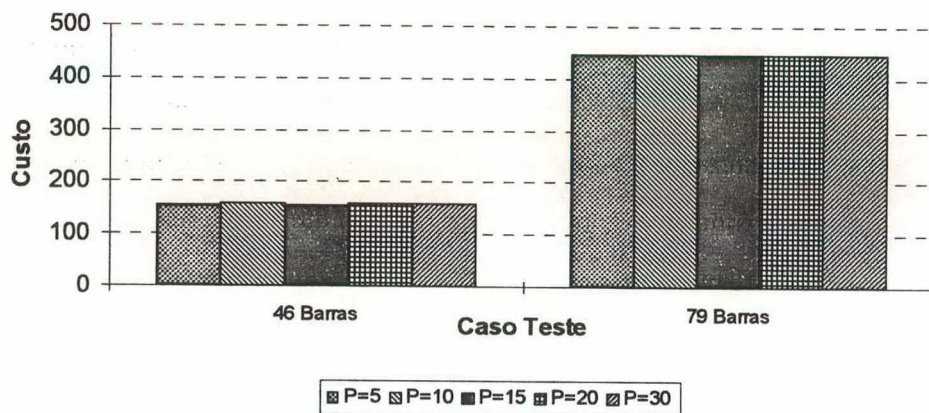


Figura 5.12 Sensibilidade ao porcentagem de incremento oscilatório

Pode-se observar que o algoritmo é pouco afetado por este parâmetro, sendo que no caso do sistema SU46, a melhor solução de 154,26 u.m. foi encontrada para $P=5$ e 15%. Para o sistema SE79, a mesma solução é sempre encontrada independentemente do valor de P .

5.3.8. SENSIBILIDADE AO NÚMERO MÁXIMO DE TROCAS PERMITIDAS (T)

Na *intensificação II*, cada "expansão" da rede é realizada até conseguir um número máximo de trocas fixado pelo valor T , logo, são retirados os circuitos "ociosos", repetindo o procedimento até atingir o critério de parada explicado no capítulo anterior. Os resultados obtidos para esta sensibilidade estão na Figura 5.13.

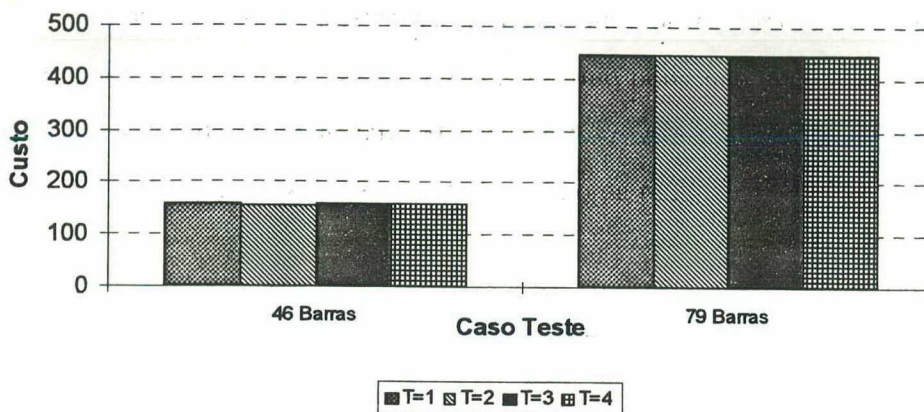


Figura 5.13 Sensibilidade ao número máximo de trocas permitidas

Este fator têm pouca influência nos resultados obtidos, embora para o caso do sistema SU46, a melhor solução seja encontrada para o valor *padrão* correspondente a $T=2$.

5.3.9. SENSIBILIDADE AO NÚMERO DE CONFIGURAÇÕES DE DIVERSIFICAÇÃO (D)

A *diversificação* é um processo que serve para procurar a solução ótima global no espaço de soluções. Consiste em iniciar a busca novamente desde o seu início, sem permitir que alguns dos circuitos que fazem parte da solução atual possam ser utilizados. Assim, os circuitos selecionados ficam proibidos de serem utilizados no próximo processo de busca. Desta maneira, o algoritmo é obrigado realizar buscas em outras regiões do espaço de soluções. O resultado para esta análise de sensibilidade aparece na Figura 5.14

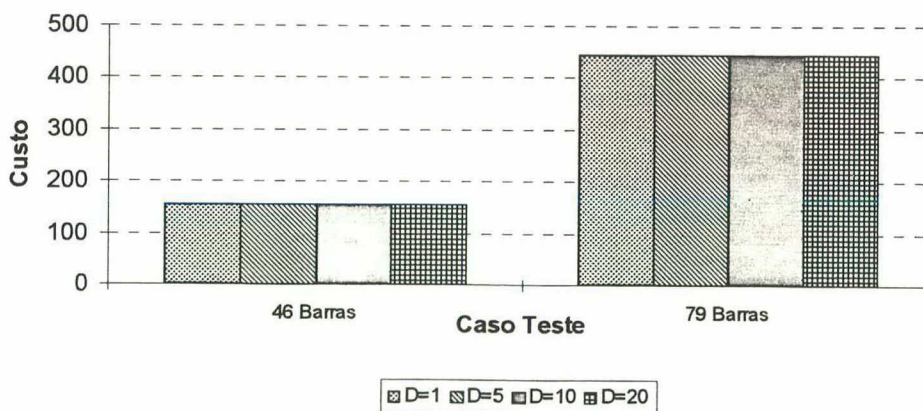


Figura 5.14 Sensibilidade ao número de configurações de diversificação

Para ambos os casos, pode-se observar que independentemente do número de configurações utilizado, se os parâmetros de entrada **estão ajustados**, consegue-se encontrar a solução de menor custo **sempre** na primeira configuração. Este resultado não significa que o processo de diversificação não seja útil, muito pelo contrário, sua importância está em permitir o ajuste de parâmetros e conferir que a solução encontrada é a melhor que o modelo pode oferecer.

Em resumo, para solucionar um problema novo, utilizam-se os parâmetros *padrão* e verifica-se o comportamento do processo de *diversificação* para várias configurações. Se a primeira configuração é a de menor custo entre todas as encontradas, então pode-se dizer que os parâmetros *padrão* servem para solucionar esse sistema, e a solução corresponde com a primeira configuração. Em caso contrário, deve-se fazer análises de sensibilidade aos diferentes parâmetros, segundo foi explicado no capítulo anterior.

Assim, caso a configuração correspondente à solução não seja a primeira delas, procede-se a um ajuste de parâmetros até que a melhor configuração passe a ser a primeira do conjunto. Neste processo, é possível que se encontre uma solução de menor custo ainda que a melhor encontrada antes do ajuste de parâmetros.

Neste trabalho comprovou-se experimentalmente que para os casos teste não é possível conseguir soluções melhores que aquelas encontradas ao se utilizar os parâmetros *padrão*.

5.3.10.SENSIBILIDADE AO TAMANHO DA LISTA TABU DE DIVERSIFICAÇÃO (K)

A *diversificação* requer de uma lista tabu própria, que evita ciclagem na escolha de circuitos definidos como proibidos para a próxima busca. Aqui foram testados diferentes valores de K e os resultados são ilustrados na Figura 5.15

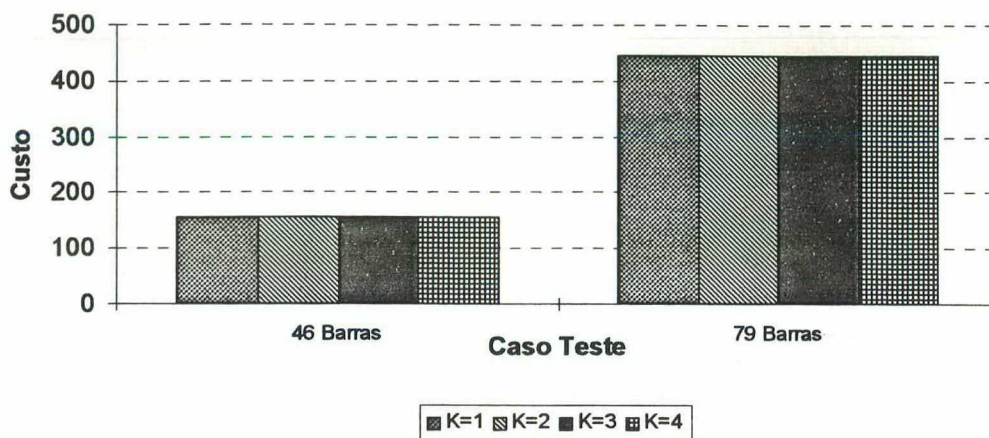


Figura 5.15 Sensibilidade ao tamanho da lista tabu de diversificação

Os resultados observados indicam que a influência do parâmetro K frente aos demais parâmetros é pouco relevante, confirmando a hipótese de que os parâmetros *padrão* estão bem ajustados, pois o algoritmo consegue a melhor solução na primeira configuração.

5.3.11. SENSIBILIDADE AO NÚMERO DE CIRCUITOS PROIBIDOS PARA O PROCESSO DE DIVERSIFICAÇÃO (L)

Para a busca de cada configuração de *diversificação*, é necessário definir o número de circuitos candidatos L , que serão proibidos. Para esta análise, L foi variado desde 1 até 4 e os resultados são ilustrados na Figura 5.16

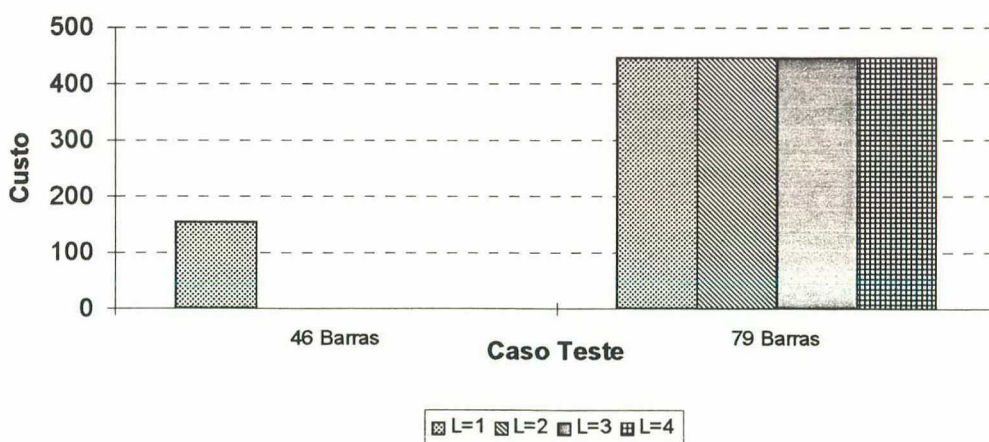


Figura 5.16 Sensibilidade ao número de circuitos proibidos para diversificação

Embora este parâmetro não seja relevante no resultado final dos sistemas de teste, seu valor não deve ser alto já que o algoritmo pode não encontrar solução viável, tal como aconteceu com o sistema SU46 para $L > 1$. A escolha do valor de L dependerá do número de circuitos candidatos e do tamanho da rede.

5.4. DETERMINAÇÃO PRÁTICA DE PARÂMETROS DE ENTRADA

Neste trabalho, a metodologia desenvolvida permitiu encontrar uma solução final viável de mínimo custo de forma automática. Para tanto, foi necessário *sintonizar* os parâmetros de entrada de maneira que pudessem servir para encontrar uma solução de boa qualidade em qualquer problema.

O conjunto de parâmetros *sintonizados* foi denominado de parâmetros *padrão*. Assim, utilizando os parâmetros *padrão*, foi possível encontrar as melhores soluções conhecidas para os sistemas de teste analisados. Portanto, recomenda-se utilizar os parâmetros *padrão* indistintamente para solucionar qualquer problema, sendo conveniente entretanto propor um procedimento simples, que permita conferi-los para a solução de uma rede dada.

A maneira como se chegou aos parâmetros *padrão* foi experimental, sendo que inicialmente foram colocados valores que foram considerados "os mais lógicos". Em seguida analisou-se o comportamento da busca com esses parâmetros iniciais, de onde foi possível concluir que alguns deles são robustos, e podem ficar praticamente fixos. São exemplos de parâmetros robustos, o tipo de rede conexa inicial e o tipo de expansão utilizado.

A principal característica que determina se os parâmetros *padrão* selecionados estão "corretos", pode ser definida mediante o processo de *diversificação*, partindo da base que se os parâmetros são adequados, a configuração de mínimo custo sempre corresponderá à primeira solução encontrada. Para tanto, a *diversificação* avalia implicitamente a qualidade da solução final.

Deve-se salientar que o uso de certos parâmetros não propiciou a obtenção da solução ótima, sendo experimentalmente comprovado, que os parâmetros mais determinantes no processo de busca são: *tipo de rede conexa inicial*, C , N , J , e M .

A seguir, são propostos os passos gerais que podem ser utilizados para aferir a qualidade da solução obtida, e eventualmente, ajustar os parâmetros ao aplicar o modelo para outros sistemas:

Passos para a avaliação da solução final obtida e ajuste de parâmetros:

- I) execute o processo de busca utilizando os parâmetros *padrão*;
- II) revise o resultado do processo de *diversificação*. Se $\text{custo}(\text{config1}) < \text{custo}(\text{config}(i))$ para $i=2,..D$ a avaliação termina, e a configuração encontrada é a "melhor" solução para esse problema. Se não, vá para o passo III;
- III) execute uma análise de sensibilidade sobre os parâmetros que seguem, respeitando a ordem de prioridade na qual aparecem: tamanho da lista de candidatos (N), lista tabu de expansão (J), e vetor de frequência da expansão mudando o valor de M . vá para o passo II;

5.5. CONCLUSÕES

- Os resultados obtidos para os sistemas de teste foram satisfatórios, sendo que para o sistema SU46 conseguiu-se obter a menor solução encontrada até então mediante outras metodologias [6]. No caso do sistema SE79, a solução final obtida constitui-se em uma solução superior, no sentido de ter encontrado um menor custo da expansão, àquela reportada para este caso até a presente data [7].
- Os resultados obtidos, mostram que o algoritmo para solucionar o problema de planejamento da transmissão de longo prazo, utilizando *BT*, possui uma grande potencialidade. Assim, visualiza-se dar prosseguimento à pesquisa no sentido de desenvolver processos de busca mais eficientes.
- O conjunto de parâmetros *padrão* utilizado permite encontrar as melhores soluções finais para os sistemas de teste, servindo como ponto de partida para encontrar a solução de qualquer problema.
- Com respeito ao análise das sensibilidades, para cada parâmetro pode-se concluir o seguinte:
 - a) para iniciar o processo de busca, é recomendável se começar com uma rede conexa inicial radial;
 - b) o procedimento de expansão mais recomendável é o P2;
 - c) o tamanho da lista de candidatos analisados (N) é determinante para a qualidade da solução final. Em caso de dúvida da qualidade da solução obtida, recomenda-se fazer uma sensibilidade de este parâmetro;
 - d) o valor do indicador da *lista tabu* de expansão (J), dependerá do tamanho da rede e número de circuitos candidatos disponíveis. Embora o valor *padrão* seja útil para solucionar qualquer

problema, pode ser interessante fazer uma sensibilidade de este parâmetro;

- e) o tamanho do vetor de frequência da expansão (M) é um valor que mostrou-se ser determinante na qualidade da solução final, sendo recomendável efetuar análise de sensibilidade deste fator;
- f) o número de configurações de *diversificação* (D), ainda que não tenha sido determinante para a qualidade da solução final, é um valor muito importante (para ajudar determinar se os parâmetros de entrada estão corretos). Basicamente, se a melhor solução **não é encontrada** na primeira configuração, deve-se fazer um ajuste de parâmetros segundo foi explicado anteriormente.
- g) o restante dos parâmetros avaliados, apareceram pouco relevantes na qualidade da solução final.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida neste trabalho permite encontrar a rede de expansão da transmissão de mínimo custo para um ano horizonte especificado.

A motivação principal que levou ao desenvolvimento desta metodologia, foi a necessidade de pesquisar novas maneiras de solucionar o bem conhecido problema da expansão da transmissão de forma rápida e segura, e deste modo permitindo a sua utilização de maneira prática na análise de diversos cenários de geração e demanda. Esta necessidade surge como consequência das mudanças estruturais do setor elétrico a nível mundial, as quais permitem a participação de geradores privados no mercado de energia elétrica incrementando às incertezas associadas ao problema da expansão.

A metodologia utilizou o método heurístico de *Busca Tabu (BT)*, com o qual foi possível modelar adequadamente o problema da expansão da transmissão, o que permitiu uma implementação computacional simples sem perder de vista o grau de exatidão requerido para este tipo de problema.

A *Busca Tabu* mostrou ser uma heurística que consegue chegar em soluções ótimas locais de boa qualidade, vislumbrando-se a sua potencialidade na solução de problemas combinatoriais. Intrínseca a esta metodologia existe a desvantagem de todas as metodologias baseadas em heurísticas, concernente à ausência de uma estrutura matemática que as definam exatamente, não permitindo a demonstração matemática de convergência para o ótimo global. Não obstante a isto, a metodologia permitiu a obtenção de ótimos locais melhores que aqueles obtidos por algoritmos convencionais.

O nível de desenvolvimento alcançado neste modelo permite que ele seja utilizado no cálculo do plano de expansão da transmissão de problemas reais, sendo necessário contudo, alguns melhoramentos para ser considerado como um modelo formal para a solução do problema de planejamento da transmissão.

A metodologia demonstrou sua viabilidade conceitual e computacional, ao serem conferidas as melhores soluções conhecidas até a presente data para os sistemas teste utilizados.

6.2. CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

O trabalho aportou as seguintes contribuições:

- a) permitiu realizar um exame aprofundado do problema de planejamento de expansão ressaltando-se as implicações associadas à não-convexidade do problema;
- b) permitiu a interpretação adequada da teoria de *Busca Tabu* que fundamenta a metodologia, passando-a para uma linguagem específica do problema de planejamento da transmissão;
- c) foi desenvolvido um programa computacional que pode ser utilizado para encontrar soluções em problemas de sistemas reais;

6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A seguir, são propostas algumas melhoras à metodologia atual e sugeridos alguns desenvolvimentos similares baseados em *Busca Tabu*.

- a) o programa computacional atual deve ser exaustivamente testado com a finalidade de determinar aqueles procedimentos de busca que podem ser melhorados;
- b) desenvolver procedimentos de ajuste de parâmetros baseados em análises de sensibilidade, que permitam *sintonizá-los* de maneira automática;
- c) a metodologia atual pode ser facilmente ajustada para solucionar o problema de planejamento da expansão dinâmico, mediante a adição de processos de busca simples, aplicando conceitos tais como *lista tabu* e *frequência*;
- d) a *BT* pode ser utilizada em outros problemas, tais como programação de desligamentos, e de *unit commitment*, que são problemas complexos e de natureza combinatória similares ao problema tratado neste trabalho;
- e) uma aplicação interessante que deve ser pesquisada, é o cálculo dos custos marginais de longo prazo, utilizando como "dado" de entrada a rede final expandida resultante deste processo de busca.

APÊNDICE A

OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA VIA BUSCA TABU

A.1. INTRODUÇÃO

A *Busca Tabu (BT)* é uma estratégia para solucionar problemas de otimização combinatorial cuja gama de aplicações vai desde teoria de grafos e aplicações específicas até problemas gerais de pura programação inteira e inteira-mista. É um procedimento adaptativo com a habilidade de utilizar muitos outros métodos tais como algoritmos de programação linear e heurísticas especializadas, o qual serve para superar as limitações de otimalidade local.

BT teve seus origens em procedimentos combinatoriais aplicados a problemas não lineares ao final de 1970, e subseqüentemente aplicado a uma diversa coleção de problemas com os quais se têm conseguido um impressionante sucesso prático. O uso de *BT* torna possível obter soluções de qualidade superior em relação àquelas obtidas previamente com estratégias concorrentes, e geralmente com menor esforço computacional.

Neste apêndice são apresentados os princípios fundamentais que conformam a *BT* como uma estratégia para solução de problemas de otimização combinatorial [19, 20, 21, 22], destacando-se os princípios básicos da metodologia, critérios, definições e nomenclatura.

A.2. BASES E NOMENCLATURA DA BUSCA TABU

Para descrever a nomenclatura de *BT*, representa-se um problema de otimização combinatorial da seguinte maneira:

$$(P) \quad \text{Minimizar} \quad c(x): x \in X \text{ em } R_n$$

A função objetivo $c(x)$ pode ser linear ou não, e a condição $x \in X$ é imposta para restringir os componentes de x a assumirem valores discretos.

Uma ampla gama de procedimentos heurísticos e ótimos, para resolver problemas que podem ser colocados na forma de (P), podem ser caracterizados convenientemente fazendo-se referência a seqüências de *movimentos* que levam de uma

solução candidata, selecionando um determinado $x \in X$, para outra. Define-se um movimento s como sendo um mapeamento definido sobre um subconjunto $X(s)$ de X :

$$s: X(s) \rightarrow X$$

Para poder introduzir os conceitos principais da *BT* é interessante fazer uma breve discussão sobre a natureza dos movimentos que são relevantes no contexto que será examinado. Em muitas aplicações interessantes, se x' e x'' são elementos diferentes do conjunto $X(s)$, então $s(x') \neq s(x'')$; isto é conveniente para a classificação de movimentos, nos quais, diferentes soluções são transformadas em novas soluções candidatas também diferentes. Um exemplo simples é o conjunto de movimentos entre os vértices adjacentes de um hipercubo unitário 0-1, representado mediante o movimento $s(x) = x + e_j$, onde e_j é um elemento do vetor de dimensão n , com valor unitário na posição j . Se X representa o conjunto de todos os vértices, então uma forma apropriada para $X(s)$, neste caso, é dada por $X(s) = \{x \in X : x_j = 0\}$. A figura A.1 ilustra os vértices para $n=3$:

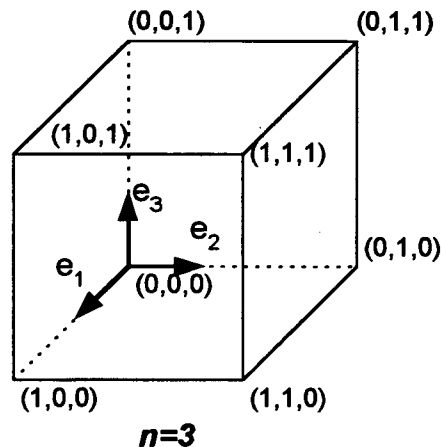


Figura A.1. Vértices do cubo unitário tridimensional

Outro exemplo, é o movimento comumente encontrado em teoria de grafos, que consiste num aumento do passo definido em relação a um caminho alternativo. No contexto da otimização não linear, o movimento padrão é definido por $s(x) = x + ud$, onde d é um vetor direção dado, tal como um gradiente generalizado, e u é um escalar representando o tamanho do passo. Este tipo de movimento poder mapear diferentes soluções candidatas no mesmo vetor, a menos que sua classificação dependa das definições tanto de u quanto de d .

A.3. UMA FORMA SIMPLIFICADA DE BUSCA TABU

Para introduzimos os conceitos associados a *BT*, é conveniente referenciar uma classe de metodologias conhecidas como heurísticas de Subida da Montanha (*SM*) ou "*Hill Climbing Heuristics*". Essas heurísticas encarregam-se de progredir unidirecionalmente desde seu ponto de partida até um ponto ótimo local. No contexto atual de minimização, a forma da montanha é "invertida", de tal maneira que a direção de escalada segue o descenso da montanha.

HEURÍSTICA DE SUBIDA DA MONTANHA

1. Selecione um $x \in X$ inicial
2. Selecione algum $s \in S(x)$ tal que
 $c(s(x)) < c(x)$
se não existe s , x é um ótimo local e o método termina. De outro modo,
3. Faça $x := s(x)$
e retorne ao Passo 2.

Ainda que conceitualmente simples em linhas gerais, tais metodologias apresentam características bastante úteis, e de fato podem englobar uma variedade de algoritmos matemáticos. Por exemplo, se X é o conjunto de pontos extremos viáveis para um *PL* e $S(x)$ é o conjunto de movimentos que levam de um ponto x a um ponto extremo adjacente, então o método simplex utilizando uma perturbação implícita ou explícita para evitar degenerescência, fica semelhante a um procedimento de subida de montanha.

A principal limitação de um procedimento de *SM* num problema combinatorial é que o ótimo local obtido em seu ponto de parada, quando não são possíveis melhores movimentos, pode não ser um ótimo global.

A *BT* guia esta heurística para continuar a exploração de modo que a busca não se torne confusa pela ausência de movimentos de melhora, e sem voltar ao ótimo local do qual emergiu previamente. Considerando esta habilidade de incorporar e guiar outro procedimento, como se fosse uma subrotina, a *BT* pode ser vista como uma *meta - estratégia* ou *metaheurística* para solucionar problemas combinatoriais.

A seguir é descrito de forma simplificada o funcionamento do procedimento.

É criado um subconjunto T de S cujos elementos são chamados de *movimentos tabu*. Os elementos de T são determinados mediante uma função não-Markoviana que utiliza informação histórica do processo de busca, englobando até um número de t iterações passadas, onde t pode ser fixo ou variável dependendo da aplicação ou estágio da busca. Para pertencer a T , o movimento deve cumprir com uma lista de especificações ou *condições tabu*, por exemplo inequações lineares ou relações lógicas, expressas indiretamente em termos de uma solução de prova atual x ; por exemplo, deixando T assumir a forma $T(x) = \{s \in S : s(x) \text{ cumpre as condições tabu}\}$. Para um T apropriadamente determinado e uma função de avaliação denominada por *OPTIMUM*, que será detalhada mais adiante, o procedimento pode ser descrito assim:

BUSCA TABU SIMPLES

1. Selecione um $x \in X$ inicial e faça $x^* := x$. Ponha o contador de iterações $k=0$ e comece com T vazio.
2. Se $S(x)-T$ está vazio, vá para o passo 4.
Se não faça $k=k+1$ e selecione $s_k \in S(x)-T$ tal que $s_k(x) = \text{OPTIMUM}(s(x) : s \in S(x)-T)$.
3. Faça $x := s_k(x)$. Se $c(x) < c(x^*)$, onde x^* indica a melhor solução atualmente encontrada, faça $x^* := x$.
4. Se um número dado de iterações foi ultrapassado ou x^* foi o último melhorado, ou se $S(x)-T$ está vazio chegando a este passo diretamente do passo 2, termina.
De outro modo, atualize T e volte ao passo 2.

Desta versão há três aspectos que precisam atenção: (1) a utilização de T provê do elemento da busca chamado "busca restrita", e portanto as soluções geradas dependem, criticamente, da composição de T e da maneira como é atualizado no passo 4; (2) o método não faz referência à condição de otimalidade local, exceto implicitamente onde um ótimo local supera a melhor solução encontrada anteriormente; (3) o "melhor" movimento, ao invés de um movimento de melhora, é escolhido a cada passo, empregando os critérios embutidos na função *OPTIMUM*. Entende-se por "melhor" movimento aquele que oriente a busca de uma forma adequada evitando ótimos locais. Assim, o "melhor" movimento não necessariamente melhora a função objetivo.

A seguir são apresentadas algumas estruturas de dados convenientes na implementação do procedimento.

Inicialmente serão consideradas algumas formas da função *OPTIMUM* e do conjunto tabu T . Uma escolha natural para a função *OPTIMUM* consiste em selecionar $s_k(x)$ tal que

$$c(s_k(x)) = \text{Minimo}\{c(s(x)) : s \in S(x) - T\}$$

Os casos em que não há inclusão de um movimento em T , se devem ao fato de que ele não violou os requisitos impostos por um conjunto de restrições de desigualdade (tais como, limites das variáveis) e a definição do conjunto $S(x)$ pode ser feita de maneira semelhante, a solução $s(x)$ obtida da definição de *OPTIMUM*, definido com base nestas considerações, pode representar o resultado da solução de um problema auxiliar de otimização. Esta possibilidade é importante em aplicações de programação inteira, que usam um método de programação linear como uma subrotina heurística.

Pela forma anterior de *OPTIMUM*, cada vez que se executa o passo 2 do algoritmo da *BT* simplificada, o x atual move-se para um $s(x)$ que produz a melhor melhora, ou, na falta de possibilidade de melhora, a menor degradação do objetivo $c(x)$, sujeito à restrição de que somente são permitidos os movimentos não tabu. Há casos em que o conjunto $S(x)-T$ pode ser grande, e, sendo processado item a item. Portanto, ao invés de soluções auxiliares, é interessante que a função *OPTIMUM* esteja baseada em uma estratégia de amostragem desta região, reduzindo $S(x)-T$ com a finalidade de identificar o mínimo $c(s(x))$. Um exemplo de uma estratégia que usa amostragem, seria tomar o primeiro s que satisfaça $c(s(x)) < c(x)$, porém *BT*, geralmente trabalha mais agressivamente. Este fato contrasta com métodos que progridem lentamente até um ótimo local, partindo da premissa que uma progressão lenta apropriadamente regulada fará com que o ótimo local encontrado esteja mais próximo de um global. Igualmente nestes casos pode-se ter vantagens em integrar *BT*.

O fato da *BT* proceder de uma maneira mais agressiva, deriva-se de duas considerações. A primeira é que muitos problemas de otimização podem ser solucionados otimamente fazendo o "melhor movimento disponível" a cada passo, um fenômeno que vai além dos resultados bem conhecidos para algoritmos "gulosos" ou "*greedy algorithms*".

A segunda consideração origina-se na estrutura do algoritmo, na qual a otimalidade local não representa uma barreira, e portanto oferece menos restrições para que o procedimento pare neste ponto. Melhor do que gastar proporcionalmente mais tempo em regiões cujas soluções são proporcionalmente menos atrativas, *BT* encarrega-se de dedicar a maior parte do seu tempo na exploração de regiões onde existem boas soluções. Por exemplo, em situações onde as estratégias de progressão são lentas, suas estruturas podem ser utilizadas em conjunto com *BT* para prover um bom ponto de partida inicial.

A regra simples que seleciona o $c(s(x))$ mínimo, sujeita às restrições tabu, têm provado sucesso em várias aplicações. Quando é difícil calcular o mínimo, pode-se fazer uma aproximação, fazendo a escolha em um espaço reduzido da região total.

Uma forma simples e igualmente efetiva para o conjunto T pode ser dada por:

$$T = \left\{ s^{-1} : s = s_h \text{ Para } h > k - t \right\}$$

Onde k é o indicador de número de iterações e s^{-1} é movimento inverso de s ; isto é $s^{-1}(s(x)) = x$. Ou seja, T é o conjunto daqueles movimentos que poderiam "retornar" um dos movimentos realizados nas t iterações mais recentes do processo de busca. Assim, a operação de atualizar T no passo 3 do processo simplificado de busca em efeito consiste de colocar $T := T - s_{k-t}^{-1} + s_k^{-1}$. Onde as sinais de + e - indicam a operação de eliminação e adição de elementos no conjunto dado. Por convenção, quando $k \leq t$ eliminamos o termo s_{k-t}^{-1} .

A forma sugerida acima para o conjunto tabu é baseada na suposição de que a probabilidade de ciclagem, isto é, seguir uma seqüência de movimentos que levam novamente a uma solução visitada no passado, é uma relação inversa da distância da solução de prova atual x até a solução anterior. Se a distância é medida em termos do número de movimentos feitos, ou seja, segundo o número de iterações realizadas desde que a solução anterior foi visitada, sujeita à condição de que nenhum movimento realizado permitiu o retorno a um dos seus predecessores, então T é projetado para evitar a ciclagem de acordo com as considerações feitas acima.

Dentro da estrutura com regras de escolha e condições tabu, o objetivo mais geral é evitar retornar a um *estado de solução* anterior. Assim, para uma solução

visitada previamente, onde o melhor movimento disponível não-tabu para deixar essa solução, é o mesmo movimento anterior. Neste caso, T deve tomar uma forma mais apropriada $T = T_1 \cup T_2$, onde $T_1 = \{s_h^{-1} : h > k - t_1\}$ e $T_2 = \{s_h : h > k - t_2\}$.

Assim, evitando a escolha de um movimento que representa o reverso de qualquer um outro, feito durante uma sequência de t iterações, o procedimento progride afastando-se progressivamente de todos os estados de solução das t iterações anteriores, no sentido determinado pela natureza dos movimentos em S , e para um t suficientemente grande, a probabilidade de retornar a um estado solução já visitado, efetivamente desaparece. Isto não quer dizer, contudo, que o objetivo da BT seja escolher um elevado valor para t .

Desde uma perspectiva de competição, quanto menor é o valor de t , maior é a liberdade de escolha que o método têm para guiar-se através das soluções que a função *OPTIMUM* achar preferíveis. Uma descoberta empírica para a aplicação dos métodos de BT , é que t têm uma ampla gama de valores estáveis, que previnem ciclagem e levam a boas soluções. Um desafio para pesquisar é desenvolver a teoria que consiga explicar este fenômeno.

De fato, na prática, T raras vezes toma a forma mostrada previamente, por duas razões. Primeiro, em alguns casos, quando o movimento s de $S(x)$ é escolhido, a condição tabu que previne s^{-1} de ser selecionado também deve prever um amplo conjunto de movimentos, dominados por s^{-1} , de serem selecionados. Segundo, por considerações de conservação de espaço de memória e facilidade de processamento, geralmente, é desejável armazenar não toda a gama de atributos requeridos para caracterizar um movimento ou solução, portanto em vez disso é armazenado um número menor de atributos, os quais potencialmente podem ser compartilhados por outros movimentos ou soluções. Sobre estas circunstâncias, uma lista tabu T não consiste simplesmente dos movimentos s_h^{-1} para $h > k - t$, mas de coleções de movimentos C_h , onde cada C_h têm seus membros definidos mediante certos atributos, incluídos em suas condições tabu, fazendo com que as coleções de movimentos C_h contenham s_h^{-1} e outros movimentos que igualmente satisfaçam estas condições. Assim, mais geralmente, T toma a seguinte forma:

$$T = \cup C_h : h > k - t \quad \left(\text{onde } s_h^{-1} \in C_h \right)$$

Os conjuntos C_h também podem conter outros elementos diferentes de s_h^{-1} com a finalidade de prevenir ciclagem.

Outro aspecto importante em relação ao tratamento de T é o caso onde $S(x)-T$ é vazio, no passo 2 do procedimento simplificado da BT . A atualização de T no passo 4, deixando de lado a atualização implícita de T , como mostrado anteriormente, que elimina a restrição tabu armazenada nas t iterações anteriores, é realizada criando-se uma hierarquização no sentido de eliminar o menor número possível de elementos de T , na seqüência dos mais antigos para os mais novos, possibilitando que algum ou alguns movimentos assumam novamente a sua condição não tabu.

Pode-se mostrar que tal organização hierárquica leva a um ótimo em um número finito de passos, em exemplos simples, se t puder crescer juntamente com a iteração k , entretanto, isto pode levar à realização de movimentos supérfluos que poderiam ser evitados por refinamentos.

A.4. UTILIZAÇÃO DE NÍVEIS DE ASPIRAÇÃO

Um elemento importante da BT é a incorporação de uma *função de nível de aspiração* $A(s,x)$, cujos valores dependem de um movimento especificado s e/ou vetor x . diz-se que um nível de aspiração é *alcançado* se

$$c(s(x)) < A(s,x)$$

A função de $A(s,x)$ é prover uma flexibilidade adicional na escolha de bons movimentos, permitindo ignorar o estado tabu caso o nível de aspiração seja alcançado. O objetivo é fazer esta operação de uma maneira que conserve a habilidade de evitar ciclagem.

Para mostrar uma forma de alcançar este objetivo, referenciar-se-á o movimento num sentido limitado, como um caso particular de mapeamento, por exemplo, falando de um movimento "de x para $s(x)$ ". Este movimento, que depende tanto de x como de $s(x)$ para sua identificação, será chamado de *movimento solução-específico*.

Existem três níveis estratégicos para evitar ciclagem, os quais envolvem a prevenção de um movimento solução-específico de x para $s(x)$ se: (1) $s(x)$ foi visitado anteriormente; (2) o movimento s já foi aplicado a x anteriormente; (3) o movimento s^{-1} já foi aplicado anteriormente a $s(x)$.

Desses níveis estratégicos, o primeiro deles é o único que previne um movimento solução-específico que assegura completamente que não haverá ciclagem, o processo de checagem de que a validade do estado tabu de um movimento pode ser eliminado na base de (1), geralmente, requer empregar mais memória e maior esforço do que seja conveniente aplicar.

Se um movimento tabu é permitido somente com base na falha da condição (2), então é possível reverter um movimento tão logo ele seja realizado, voltando a uma solução visitada anteriormente. Portanto, vê-se que listas tabu construídas assim não trabalham bem. Entretanto, a condição (3) é compatível com a estrutura de lista tabu. Utilizando a checagem da condição (3) para evitar ciclagem e permitindo realizar um movimento tabu que leve x para $s(x)$, a não ser que o movimento solução-específico de $s(x)$ a x já tenha ocorrido antes, no objetivo de prevenir o retorno a uma solução anteriormente gerada, o teste usando a condição (3) se mostrou mais efetivo do que o teste usando a condição (2). Adicionando a condição (2) à condição (3) serve para se chegar mais próximo da efetividade da condição (1).

A importância destas observações na criação de uma função efetiva de nível de aspiração, poderá ser melhor vista através de um exemplo concreto. Definindo $A(s,x)$ como o valor mínimo de $c(x')$ que poderia ser encontrado *revertendo-se* um movimento solução-específico anterior a x' para algum $s'(x')$ tal que $c(s'(x'))=c(s(x))$.

Embora a definição pareça um tanto complicada, o conceito mencionado é bastante simples e a função de nível de aspiração em questão é fácil de ser armazenada e atualizada. Suponha que os valores possíveis de $c(x)$, para diferentes vetores x , são dados pelos inteiros $q=1,2,\dots,U$ e seja $BEST(q)$ =valor mínimo de $c(x)$ que poderia ser alcançado pela reversão de um movimento anterior que produziu $c(s(x))=q$.

Inicializa-se $BEST(q)=U+1$. Então, no momento em que é realizado um movimento solução-específico, atualize $BEST(q)$, para $q=c(s(x))$, através da regra $BEST(q)=\text{Min}\{BEST(q),c(x)\}$. Após isto, o nível de aspiração poderá permitir a realização de um movimento tabu que leve de um x diferente, para $s(x)$ se:

$$c(s(x)) < BEST(c(x))$$

Este tipo especial de aspiração é um exemplo de checagem da condição (3).

A forma correspondente da condição (2), neste exemplo, é dada definindo-se $A(s,x)=0$ menor valor de $c(s'(x'))$ encontrado sobre todos os movimentos solução-específicos anteriores, partindo de algum x' para algum $s'(x')$, onde $c(x')=c(x)$. Esta função de nível de aspiração alternativa pode ser desenvolvida, inicializando-se $BEST(q)$ da mesma maneira anterior, mas quando um movimento solução-específico de x para $s(x)$ é feito, $BEST(q)$ é atualizado, para $q=c(x)$, do seguinte modo:

$$BEST(q)=Min\{BEST(q),c(s(x))\}$$

A condição para a realização de um movimento tabu que leve de um x diferente para $s(x)$ é idêntica à anterior, ou seja:

$$c(s(x))<BEST(c(x))$$

As condições (2) e (3) são facilmente combinadas, fazendo-se as duas atualizações de $BEST(q)$ como mostrado anteriormente, tendo em mente que o teste para que o estado tabu seja desprezado, é o mesmo em ambos os casos.

Outras funções de nível de aspiração que podem ser facilmente checadas e atualizadas são feitas mantendo registros semelhantes de outros atributos do movimento, inclusive pode-se usar funções de nível de aspiração múltiplas, que aumentam a probabilidade do movimento escapar de seu estado tabu, requerendo que no mínimo uma das inequações associadas seja válida. Estas, entretanto, exigem um maior esforço na checagem e armazenagem. Uma alternativa interessante é definir $A(s,x)$ somente em relação aos movimentos atualmente considerados tabu, de uma maneira que será discutida a seguir.

A.5. RESTRIÇÕES TABU INTEGRADAS COM CRITÉRIOS DE NÍVEL DE ASPIRAÇÃO

As restrições tabu e o critério de nível de aspiração da *BT* desempenham um papel dual no que diz respeito a restringir e direcionar o processo de busca. Restrições tabu permitem que o movimento seja considerado admissível se elas não se aplicam, enquanto o critério de aspiração permite que o movimento seja considerado admissível se ele se aplica, ou seja é satisfeito. Esta complementaridade dos conceitos de

restrições tabu e critério de aspiração permite que se trate deles integrando-os numa estrutura comum.

Para se descrever esta estrutura, é conveniente que seja apresentada uma notação para os atributos dos movimentos que são usados para definir o estado tabu. Especificamente, $a_p(s,x)$, $p=1,...,g$, é o conjunto de funções que identificam certos atributos do movimento s aplicado à solução x . Para clarear estes conceitos, será apresentado um procedimento que integra critério de aspiração e restrições tabu para o problema do caixeiro viajante, baseado no uso dos movimentos 2-OPT que eliminam dois arcos não adjacentes da rota e adicionam os dois únicos arcos que criam uma nova rota. Funções de atributos para esta aplicação são definidas de uma maneira simples, ou seja, $a_1(s,x)$ e $a_2(s,x)$ identificam os dois arcos adicionados e $a_3(s,x)$ e $a_4(s,x)$ identificam os dois arcos eliminados da rota, tomando a $g=4$.

O grau de especificação na identificação de tais atributos dos movimentos pode variar. Por exemplo, $a_1(s,x)$ e $a_2(s,x)$ podem se referir aos arcos adicionados sem prestar atenção a nenhuma ordenação em particular ou pode diferenciar, mais precisamente os arcos, por exemplo $a_1(s,x)$ identifica o maior dos dois arcos adicionados e $a_2(s,x)$ identifica o menor, ocorrendo o mesmo para os arcos eliminados.

Para se implementar estas funções de atributos diz-se que E é o conjunto de todos os elementos que podem ser identificados como atributos dos movimentos. No problema do caixeiro viajante, E consiste no conjunto de todos os arcos do grafo. Pode-se identificar também outros atributos relevantes dos movimentos, neste exemplo, que fazem a natureza de E mais complexa, por exemplo, pode-se introduzir $a_5(s,x)$ e $a_6(s,x)$ para representar os valores de $c(x)$ e $c(s(x))$, no caso onde E poderia incluir, além dos arcos, o comprimento das rotas. Generalizando, neste caso, E poderia ser tratado como uma coleção de conjuntos que contivessem os elementos para as diferentes classes de atributos, podendo-se notar que a identificação de $a_5(s,x)$ e $a_6(s,x)$ nos coloca numa posição mais próxima do tipo de critério de nível de aspiração discutido na seção anterior. Os níveis de aspiração, são definidos em relação aos elementos de E e tratados pela mesma estrutura de tempo de permanência anteriormente indicada para criação e manutenção de listas tabu.

Em particular, uma lista tabu diferente, T_p , $p=1,2,...,g$, é criada para cada atributo $a_p(s,x)$, podendo-se definir:

$$T_p = \{a_p(s_h, x^h) : h > k - t_p\}$$

onde s_h e x^h se referem ao movimento s e ao vetor x na iteração h .

No exemplo do caixeiro viajante, isto corresponde à criação de uma lista tabu para cada arco na troca 2-OPT, e dar a cada lista T_p seu próprio tamanho t_p . O menor dos dois arcos eliminados de uma rota, deve ter um período de permanência menor na lista tabu do que o maior, isto é, permitindo-se que ele seja novamente adicionado à rota mais rapidamente.

Estado tabu, ou equivalentemente, estado de aspiração, é definido neste momento pela combinação destas listas tabu com uma função de aspiração $A(e)$ definida em relação aos elementos e de E . Assim, quando um elemento $e = a_p(s, x)$ é um atributo do movimento de x para $s(x)$, por exemplo, onde e é um dos arcos adicionados à rota representada por x , o valor de $A(e)$ é atualizado de acordo com um critério semelhante ao da seção anterior, ou seja, $A(e) = \min(A(e), c(x))$ ou $A(e) = \min(A(e), c(x), c(s(x)))$, etc. $A(e)$ é inicializado com um valor muito grande para cada valor e em E e atribui-se a ele novamente este valor, toda vez que e não pertencer a mais nenhuma das listas tabu.

O estado tabu ou estado de aspiração, de todos os movimentos pode ser uma função do estado de seus atributos. Dito que o movimento candidato s aplicado a x produzirá um valor objetivo $c(s(x))$, é natural atribuímos a este movimento um estado liberado, indicando que ele satisfaz o teste de aspiração, se $c(s(x))$ é menor que o valor aspirado para um determinado atributo. Especificamente, um atributo $e = a_p(s, x)$ recebe um estado liberado se $c(s(x)) < A(e)$ para $e = a_p(s, x)$. Todos os elementos e , fora da lista tabu recebem automaticamente o estado liberado. Outros recebem o estado liberado se o movimento para o qual eles contribuem produz um valor objetivo superior ao valor aspirado armazenado quando eles se tornaram tabu. O movimento s ou, mais precisamente, a transição de x para $s(x)$, pode receber um estado liberado se todos ou um número selecionado de seus atributos receberam um estado liberado ou, até mesmo, se um atributo de importância suficiente recebeu um estado liberado.

A partir desta discussão, vê-se que a representação do conjunto tabu T como uma coleção de movimentos, isto é, um subconjunto de S , no procedimento simplificado de BT visto anteriormente, não é adequado para aplicações grandes. Em geral, T pode ser visto como uma coleção de pares (s, x) , ou seja, de movimentos solução-específicos, caracterizados por um conjunto selecionado de atributos. A

especificação $s \in S(x)-T$ fica substituída pela especificação $s \in S(x)$ e $(s,x) \notin T$. No caso em que pares (s,x) de T são capazes de identificar soluções, sem fazer referência aos movimentos aplicados a eles, a exclusão de (s,x) de T pode ser vista de uma maneira mais simples, como a exclusão de $s(x)$ de T .

Resumindo, critério de aspiração e restrições tabu podem ser usados obedecendo a uma estrutura organizacional comum e vista sobre diferentes aspectos do mesmo princípio conceitual. Num extremo, uma aspiração $A(e)$ que é fixada menor do que qualquer valor de $c(x)$ possível corresponde a um pré-estabelecimento do estado tabu. O motivo que valida esta forma de integração de critério de aspiração e restrições tabu é a hipótese que diferentes atributos dos movimentos podem ter diferentes influências em relação à qualidade das soluções geradas, sendo assim, sujeitos a diferentes tempos de duração de seu estado tabu, isto é, devem ser armazenados em listas tabu de diferentes tamanhos, e governados por diferentes níveis de aspiração, que podem ser levados a cabo pelo mesmo mecanismo geral.

A.6. A FUNÇÃO DE MOVIMENTOS DOMINANTES E DEFICIENTES

Dominância e equivalência agem um pouco diferente em BT que nos contextos usuais de otimização, requerendo referências à natureza do movimento aplicado. Para ilustrar, considere um problema binário da mochila da seguinte maneira:

$$\text{Maximizar } 7x_1 + 6x_2 + \dots + 4x_r$$

$$\text{s.a.} \quad 4x_1 + 5x_2 + \dots + 3x_r \leq 20$$

Se uma condição tabu previne um movimento que substitui $x_1=0$ por $x_1=1$, então por considerações aparentes de dominância poder-se-ia prevenir também o movimento que substitui $x_2=0$ por $x_2=1$. Na direção contrária uma condição tabu que previne um movimento substituindo $x_2=1$ por $x_2=0$ deveria prevenir também um movimento de $x_1=1$ a $x_1=0$. Note que esta dominância, caracterizada em relação aos movimentos, não é do mesmo tipo da dominância que implica que uma variável terá valor zero numa solução ótima. Aqui, possivelmente tanto x_1 como x_2 podem ser iguais a 1.

No caso onde x_2 tem coeficientes idênticos aos de x_1 , de maneira que seus movimentos correspondentes são vistos como equivalentes, são necessárias extensões semelhante das restrições exigidas por tabu. A equivalência age diferentemente de estrita dominância, entretanto, um movimento não é permitido se uma alternativa estritamente dominante está disponível. Por exemplo, o movimento de $x_1=1$ para $x_1=0$ não será permitido se $x_2=1$ na solução candidata em questão. Movimentos equivalentes não trazem limitações correspondentes, embora possam ser classificados arbitrariamente com o intuito de serem tratados de maneira similar que movimentos estritamente dominantes.

Sabendo que a *BT* previne a ocorrência de certos movimentos, pode-se aplicar o critério de avaliação de uma heurística padrão dentro de *OPTIMUM*, o que pode levar à escolha do "melhor" movimento como sendo um que não poderia ser realizado. Por exemplo, no problema da mochila, uma heurística troca variáveis na solução mantendo a factibilidade, substituindo $x_i=1$ por $x_j=1$ para um par específico (i,j) , e avaliando a troca com base na sua contribuição na função objetivo. A heurística opera sem problemas quando é aplicada a um procedimento de *SM*, entretanto, novas circunstâncias aparecem quando a heurística inclui em seu corpo a função *OPTIMUM*. A avaliação da heurística deve ser modificada para proporcionar à *BT* habilidade de achar condições não encontradas durante a *SM*.

Especificamente, no exemplo anterior do problema da mochila, a troca que substitui $x_1=1$ por $x_2=1$ poderá ser vista como tendo um valor de avaliação mais alto, isto é, produzirá uma melhor mudança na função objetivo, que a troca que substitui $x_1=1$ por $x_7=1$. Observe que ambos os movimentos são de piora.

BT, entretanto, classifica o primeiro movimento como um *movimento deficiente*, pois ele não permite nenhuma possibilidade de melhora na solução. Tais movimentos são eliminados de consideração pela *OPTIMUM*, sem levar em conta o fato que eles podem receber avaliações mais altas que outros movimentos da heurística de *SM* padrão.

A.7. LISTA TABU E OSCILAÇÃO ESTRATÉGICA

O aspecto mais importante da *BT* deriva-se de induzir o comportamento da busca, que está composto pelo tipo de regras produzidas mediante uma lista tabu simples. Um dos efeitos de uma lista tabu feita assim, é que cria uma sucessão de soluções nas quais o valor da função objetivo oscila. Em algumas aplicações, onde as

restrições confinam as soluções viáveis numa região moderadamente limitada, é vantajoso o uso de listas tabu adicionais, com a finalidade de induzir *oscilação estratégica* de outros parâmetros.

Do ponto de vista mais geral, muitos tipos de procedimentos de busca heurísticos possuem "opostos de espelho" ou *mirror opposites*, como por exemplo as seguintes classificações de métodos: "construtivo ou destrutivo", "interior ou exterior", "viável ou inviável", "primal ou dual", e assim por diante. Melhor do que selecionar somente um tipo de busca da classificação anterior, uma alternância entre eles pode abrir uma ampla gama de possibilidades. Tipicamente, podem ser organizadas estratégias opostas de tal maneira que cada ponto de cruzamento entre elas represente um ponto de otimalidade local, relativo a uma dada orientação de busca. Listas tabu que não se limitem em proibir movimentos de retorno, mas que obriguem tais cruzamentos e retornos, oferecem uma maneira efetiva de evitar a armadilha de soluções subótimas.

Outra vantagem de uma estratégia oscilatória é permitir encontrar boas soluções para condições perturbadas, onde as restrições podem ser levemente relaxadas ou reduzidas. Para uma variedade de análises pode ser muito útil conhecer soluções que estejam dentro e fora de limites de viabilidade. Semelhantemente ao tipo de condições tabu que previne movimentos de retorno, as condições que obrigam oscilação, podem ser baseadas em penalidades graduais, melhor do que em condições preventivas. As oscilações são conduzidas por uma *função pêndulo*, a qual redistribui pesos associados de acordo a satisfação de conjuntos de restrições específicas, tratadas hierarquicamente ou em paralelo, e que melhoram o valor da função objetivo. A redistribuição faz inverter a direção de busca, as distâncias ou o número de vezes com que um determinado movimento pode ser executado.

A.8. FUNÇÕES DE MEMÓRIA DE MÉDIO E LONGO PRAZO

Funções de memória de médio e longo prazo são utilizadas em *BT* para obter, respectivamente, uma intensificação local e uma diversificação global da busca. Combinadas com as funções de memória de curto prazo, representadas pelas listas tabu, as funções de médio e longo prazo propiciam uma interação entre aprendizado e esquecimento.

Memória de médio prazo age armazenando e comparando características de um número selecionado das melhores soluções candidatas geradas durante um dado período da busca.

Características que são comuns a todas, ou dizem respeito à maioria destas soluções, tais como os valores atribuídos a certas variáveis, são tomadas como atributos locais destas boas soluções. O método, então, busca novas soluções que apresentem estas características, restringindo ou penalizando movimentos disponíveis durante um período subsequente de intensificação da busca local.

A estrutura de *BT*, leva de uma só vez, a um tipo de estratégia de intensificação útil para resolver problemas de grande porte. Devido a isto, *BT* tende fortemente a concentrar-se na geração de *boas* soluções e também tende, geralmente, a incorporar somente um subconjunto de elementos de decisão, como variáveis, arcos, etc, nestas soluções. Por exemplo, no contexto do problema do caixeiro viajante, para grafos moderadamente densos, o número de arcos diferentes incorporados nas rotas de alguma solução anterior dada é, geralmente, somente uma fração do número total de arcos. Assim, após um número inicial de iterações, o método pode deixar de lado todos aqueles arcos que ainda não foram incorporados em nenhuma rota e concentrar-se na resolução do problema reduzido resultante. Por esta razão as iterações se tornam muito mais rápidas de executar, então a busca pode examinar muito mais alternativas em um mesmo espaço de tempo considerado, bem como concentrar-se em possibilidades que aparentem ser atrativas.

Usos mais avançados de memória de médio prazo englobam a criação de uma rede de boas soluções, como uma matriz para a geração de outras soluções com boas propriedades. Em particular, um conjunto de boas soluções é usado para definir uma sub-região do espaço de busca que contém estes pontos, para fornecer um foco de intensificação de busca e para lançar-se em explorações das regiões vizinhas. Tal procedimento pode ser ampliado pelo uso de formas avançadas de análise de discriminação, que buscam gerar um conjunto reduzido de inequações e condições lógicas de dois tipos:

- 1) que contenham boas soluções;
- 2) que separem as soluções boas das ruins.

A função de memória de longo prazo, cujo objetivo é diversificar a busca, aplicando princípios que são, de uma maneira geral, o reverso daqueles vistos para memória de médio prazo. Ao invés de induzir uma concentração da busca em regiões que contenham, ou que pode-se supor que contenham, boas soluções anteriormente encontradas, a função de memória de longo prazo guia o processo em direção a regiões que são caracterizadas por grandes contrastes em relação às que já foram examinadas. Este procedimento difere dos métodos que buscam diversificação pela geração de uma série aleatória de pontos de partida e, por tanto, não propiciam oportunidade de aprendizado com o passado. O objetivo é criar um critério de avaliação que possa ser usado pelo processo de busca heurística, projetado especificamente para produzir um novo ponto de partida, assim gerando um novo ponto de maneira mais inteligente do que gerá-lo por processos aleatórios. Este critério de avaliação penaliza as características que a memória de longo prazo encontra como predominantes nas execuções anteriores do processo de busca. Novamente, o problema do caixeiro viajante fornecerá o exemplo conveniente. Uma forma simples de memória de longo prazo, neste exemplo, é um contador do número de vezes que cada arco aparece nas rotas geradas. Penalizando cada arco com base neste contador, está se favorecendo a geração de *boas* rotas de partida, de acordo com a heurística escolhida para produzir estas rotas, que tendem a evitar estes arcos comumente encontrados em passos anteriores. A diversificação encontrada por este critério pode ser aumentada pela retenção destas penalidades por um período depois de impostas, transferindo-as para a heurística associada com *BT* e usar o procedimento de *BT* para procurar soluções melhores. Posteriormente as penalidades são eliminadas e a *BT* procede de acordo com seu critério de avaliação normal. O mesmo tipo de procedimento pode ser usado para continuar, diretamente do ponto atual da busca, para uma nova região, sem voltar atrás para gerar uma nova solução sem conhecimentos prévios. Uma maneira de implementar esta estratégia de longo prazo é através de uma lista tabu de longo prazo, periodicamente ativada, que pode aplicar um critério de melhora muito rigoroso que leve o processo de solução em direção a um território não explorado.

APÊNDICE B

ÍNDICES DE SENSIBILIDADE PARA O ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Um sistema de transmissão pode ser representado topologicamente por uma rede, onde aos nós se associam valores de geração e demanda, e aos ramos circuitos elétricos como linhas e transformadores [23].

Os geradores, demandas e circuitos constituem os componentes do sistema. O estado de um sistema composto de M componentes é representado por um vetor $x = (x_1, x_2, \dots, x_M)$, onde x_i é o estado do i -ésimo componente. Por exemplo, o estado da demanda em um nó é o valor de carga associada a este nó; o estado de um gerador é a máxima potência que ele pode fornecer; e o estado de um circuito de transmissão é dado pelo par (limites de transporte; admitância).

Fixando um estado x do sistema, a análise do desempenho tem como objetivo verificar se aquela configuração específica de geradores e circuitos tem capacidade de atender aquele conjunto específico de demandas. O resultado desta análise pode ser representado por uma função $\phi(x)$ que indica, por exemplo, a máxima demanda garantida (MDG) ou o mínimo corte de carga (MCC) do sistema.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O objetivo da análise de sensibilidade é calcular a variação de $\phi(x)$ em relação as variações incrementais na capacidade de seus componentes, isto é, determinar índices de sensibilidade:

$$IS_i = \partial \phi(x) / \partial x_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, M$$

onde x_i é a capacidade do i -ésimo componente do sistema.

O interesse deste apêndice é mostrar o cálculo do índice de sensibilidade em relação ao MCC, o qual serve como *fator de sensibilidade* no processo de BT.

A seguir, será examinado o cálculo de este índice para o modelo de fluxo de potência linearizado:

Seja o problema de mínimo corte de carga reproduzido abaixo na forma padrão:

$$\text{Minimizar} \quad z = \sum_{i=1}^n r_i \quad (\text{B.1})$$

Sujeito a

$$B\theta + g + r = d \quad (\text{B.2})$$

$$0 \geq -g \geq -\bar{g} \quad (\text{B.3})$$

$$0 \geq -r \geq -d \quad (\text{B.4})$$

$$-|S\theta| \geq -\bar{\psi} \quad (\text{B.5})$$

Onde:

B	matriz reduzida de susceptância;
r	vetor do corte de carga das barras;
S	matriz de incidência dos ramos;
g	vetor de injeções de potência ativa das barras;
d	vetor de demanda das barras;
θ	vetor de ângulos de tensão das barras;
\bar{f}_{ij}	fluxo máximo permitido do ramo i - j ;
γ_{ij}	susceptância do ramo i - j ;
$\bar{\psi}$	vetor de desvio angular máximo dos ramos, dado por $\bar{\psi}_{ij} = \bar{f}_{ij} / \gamma_{ij}$;
\bar{g}	vetor de capacidades de geração máximas das barras;

Para solucionar este problema mediante um algoritmo de programação linear (PL), é preciso mudar o valor do ângulo da barra de referência de 0 para um valor alto, com a finalidade de que o PL consiga encontrar ângulos positivos, de menor valor que o da referência, que permitam calcular as diferenças angulares entre os nós, sem prejudicar a exatidão da solução do problema.

No problema anterior, é necessário reformular o conjunto de equações (B.2) da seguinte forma:

$$B\theta = d - g - r \quad (\text{B.6})$$

A equação (B.6) cumpre-se quando o ângulo de referência é zero. Seja $B'\theta = P'$, expressa em sua forma matricial, onde B' é a matriz de susceptância completa não singular, e P' o vetor de potência líquida em cada barra:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ d_2 - g_2 - r_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ d_n - g_n - r_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & B_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ B_{n1} & B_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & B_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_1^{esp} \\ \theta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \theta_n \end{bmatrix}$$

Descartando a equação número 1, correspondente à barra de referência, e arbitrando o valor do ângulo da mesma, os termos em θ_1^{esp} serão transferidos para o primeiro membro, assim:

$$\begin{bmatrix} d_2 - g_2 - r_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ d_n - g_n - r_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_{21} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ B_{n1} \end{bmatrix} \theta_1^{esp} = \begin{bmatrix} B_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & B_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ B_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & B_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \theta_n \end{bmatrix}$$

Reemplazando da equação (B.6) obtêm-se a expressão geral

$$d - g - r - \begin{bmatrix} B_{21} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ B_{n1} \end{bmatrix} \theta_1^{esp} = B\theta$$

Logo, a equação (B.2) fica expressada na sua forma geral da seguinte maneira

$$B\theta + g + r = d - \begin{bmatrix} B_{21} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ B_{n1} \end{bmatrix} \theta_1^{esp}$$

Para este problema, π_d , π_g , π_r , e π_ψ serão os multiplicadores de Lagrange associados às restrições (B.2) a (B.5) respectivamente.

A partir da informação obtida mediante a solução do PL, os circuitos "críticos" de um sistema de transmissão podem ser identificados de duas maneiras:

- 1) Sensibilidade em relação ao limite de fluxo \bar{f}
- 2) Sensibilidade em relação à susceptância γ

Mantidas fixas as susceptâncias, a sensibilidade em relação ao limite de fluxo é proporcional ao vetor de multiplicadores π_ψ . Por definição, tem-se:

$$\pi_\psi = \partial z^* / \partial \bar{\psi} \quad (\text{B.7})$$

Sendo $\bar{\psi} = \bar{f} / \gamma$, e supondo γ constante, tem-se que

$$\partial \bar{\psi} = \partial \bar{f} / \gamma \quad (\text{B.8})$$

Substituindo (B.8) em (B.7), obtém-se

$$\pi_f = \partial z^* / \partial \bar{f} = \pi_\psi / \gamma \quad (\text{B.9})$$

Este índice de sensibilidade, entretanto, apresenta alguns inconvenientes:

- 1) Apenas um número reduzido de circuitos estará no limite na solução ótima do PL do problema (B.1) a (B.5). Isto implica que apenas estes circuitos terão multiplicadores π_ψ e consequentemente, π_f , diferentes de zero, o que contraria a experiência do planejamento, em que um grande número de possíveis adições afeta o desempenho do sistema.
- 2) Não é possível calcular um índice de sensibilidade π_f para colocação de um circuito entre barras que não estavam originalmente conectadas. Note-se que não é possível colocar nem mesmo um circuito fictício de limites de transmissão nulos, pois qualquer susceptância no circuito fictício perturbaria a solução do problema.

A sensibilidade em relação à susceptância não apresenta estes inconvenientes, e pode ser facilmente calculada.

Será demonstrado em seguida que

$$\pi_\gamma(k, l) = \partial z^* / \partial \gamma_{kl} = (\pi_d(k) - \pi_d(l)) \cdot (\theta_l^* - \theta_k^*)$$

Onde θ_k^* e θ_l^* são ângulos de tensão nodal na solução ótima do MCC.

O cálculo do índice de sensibilidade π_γ anterior, é interessante pois não se refere a variações no vetor de restrições, no lado direito das equações do problema

(B.1) a (B.5), mas sim a variações na matriz B , que faz parte da matriz de coeficientes do PL. Seja então o PL colocado na sua forma matricial

$$\begin{aligned} \text{Min } z &= c \cdot x \\ \text{s.t. } A \cdot x &= b \end{aligned} \quad (\text{B.10})$$

cuja solução ótima, escrita em termos das variáveis básicas x_B .

$$\begin{aligned} z^* &= c_B \cdot x_B^* \\ A_B \cdot x_B^* &= b \end{aligned} \quad (\text{B.11})$$

Onde:

z^* é o valor ótimo da função objetivo;

A_B é a base ótima;

c_B é o vetor de custos básicos;

x_B^* é a solução básica ótima.

Uma perturbação ∂A_B em coeficientes da matriz A_B leva a variações ∂x_B^* nas variáveis básicas tais que a equação

$$(A_B + \partial A_B) \cdot (x_B^* + \partial x_B^*) = b \quad (\text{B.12})$$

continue sendo atendida. Expandindo os termos da equação (B.12), obtém-se

$$A_B \cdot x_B^* + A_B \cdot \partial x_B^* + \partial A_B \cdot x_B^* + \partial A_B \cdot \partial x_B^* = b \quad (\text{B.13})$$

Lembrando que $A_B \cdot x_B^* = b$ da equação (B.11), e desprezando os termos de segunda ordem $\partial A_B \cdot \partial x_B^*$, chega-se a

$$A_B \cdot \partial x_B^* + \partial A_B \cdot x_B^* = 0 \quad (\text{B.14})$$

Colocando a expressão (B.14) em termos de ∂x_B , obtém-se

$$\partial x_B^* = -A_B^{-1} \cdot \partial A_B \cdot x_B^* \quad (\text{B.15})$$

Por sua vez, a variação ∂z^* na função objetivo é dada por

$$\partial z^* = c_B \cdot \partial x_B^* \quad (\text{B.16})$$

Substituindo (B.15) em (B.16), obtém-se

$$\partial z^* = -c_B \cdot A_B^{-1} \cdot \partial A_B \cdot x_B^* \quad (\text{B.17})$$

O termo $c_B \cdot A_B^{-1}$ representa o vetor de multiplicadores de Lagrange π^* associado às restrições $A_B \cdot x_B^* = b$. A expressão

$$\partial z^* = -\pi^* \cdot \partial A_B \cdot x_B^* \quad (\text{B.18})$$

fornece então, a sensibilidade da função objetivo em relação a variações na matriz de coeficientes. Em termos do problema (B.1) a (B.5), a variação $\partial \gamma_{kl}$ afeta a matriz B na equação (B.2), reproduzida abaixo,

$$B\theta^* + g^* + r^* = d \quad (\text{B.19})$$

em quatro elementos, isto é,

$$\partial B = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & & & \\ \dots & \partial \gamma_{kl} & \dots & -\partial \gamma_{kl} & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \\ \dots & -\partial \gamma_{kl} & \dots & \partial \gamma_{kl} & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} \begin{matrix} \leftarrow k \\ \leftarrow l \end{matrix} \quad (\text{B.20})$$

$k \qquad l$

A expressão (B.20) corresponde à definição de adições na matriz B .

Lembrando que o vetor de multiplicadores associado à equação (B.19) é π_d , a variação ∂z^* é dada, por tanto, por

$$\partial z^* = -\pi_d \cdot \partial B \cdot \theta^* \quad (\text{B.21})$$

Substituindo a expressão (B.20) em (B.21), tem-se

$$\partial z^* = (\pi_d(k) - \pi_d(l)) \cdot \partial \gamma_{kl} \cdot \theta_k^* - (\pi_d(k) - \pi_d(l)) \cdot \partial \gamma_{kl} \cdot \theta_l^* \quad (\text{B.22})$$

Colocando os termos em evidência, chega-se a

$$\partial z^* / \partial \gamma_{kl} = (\pi_d(k) - \pi_d(l)) \cdot (\theta_l^* - \theta_k^*) \quad (\text{B.23})$$

que é o índice de sensibilidade desejado.

A relação (B.23) pode ser visualizada como o efeito da transferência de um incremento de fluxo ∂f_{kl} a partir de uma barra "segura" l para uma barra "insegura" k . A diferença $\partial z = (\pi_d(k) - \pi_d(l)) \cdot \partial f_{kl}$ mede o benefício desta transferência,

pois isto equivale a diminuir a demanda na barra k e aumentá-la na barra l . O valor de ∂f_k pode por sua vez ser expresso como $(\theta_l - \theta_k) \cdot \partial \gamma_k$

APÊNDICE C

DADOS DOS SISTEMAS TESTE UTILIZADOS

A seguir são apresentados os dados dos sistemas teste utilizados neste trabalho.

C.1. Dados para o Sistema Teste SU46

DBAR		Tipo	Pgerada (MW)	Pcarga (MW)
Numero da Barra				
1		0		
2		0		443.1
4		0		300.7
5		0		238.
7		0		
8		0		72.2
9		0		
12		0		512.
13		0		185.8
14		1	944.	
16		1	1366.	
17		1	1000.	
18		0		
19		2	773.	
20		0		1091.
21		0		
22		0		81.9
23		0		458.1
24		0		478.2
26		0		231.9
27		1	54.	
32		1	450.	
33		0		229.1
34		1	221.	
35		0		216.
36		0		90.1
37		1	212.	
38		0		216.
39		1	221.	
40		0		262.1
42		0		1608.
43		0		
44		0		79.1
45		0		86.7
46		1	599.	
9999				
DLIN		Barra Fim	X(%)	Capacidade (MW)
Barra Inicio				
18		20	19.97	200
27		38	20.80	200
27		38	20.80	200
35		38	19.80	200
37		42	21.05	200
39		42	20.30	200
39		42	20.30	200
39		42	20.30	200
44		45	18.64	200
9		14	17.56	220
9		14	17.56	220
13		18	18.05	220
14		26	16.14	220
24		34	16.47	220
8		13	13.48	240
14		18	15.14	240
14		18	15.14	240
24		33	14.48	240

1	7	6.16	270
1	2	10.65	270
1	2	10.65	270
4	9	9.24	270
5	9	11.73	270
5	8	11.32	270
7	8	10.23	270
4	5	5.66	270
4	5	5.66	270
2	5	3.24	270
2	5	3.24	270
12	14	7.40	270
12	14	7.40	270
13	20	10.73	270
14	22	8.40	270
22	26	7.90	270
20	23	9.32	270
20	23	9.32	270
23	24	7.74	270
23	24	7.74	270
26	27	8.32	270
26	27	8.32	270
33	34	12.65	270
27	36	9.15	270
36	37	10.57	270
34	35	4.91	270
34	35	4.91	270
37	39	2.83	270
37	40	12.81	270
40	42	9.32	270
38	42	9.07	270
38	42	9.07	270
38	42	9.07	270
42	44	12.06	270
32	43	3.09	1400
19	21	2.78	1500
19	32	1.95	1800
46	19	2.22	1800
46	16	2.03	1800
16	17	0.78	2000
17	19	0.61	2000
18	19	1.25	600
20	21	1.25	600
42	43	1.25	600
9999			
DBAD			
Numero da Barra	Tipo	Pgerada (MW)	
3	0		
6	0		
10	0		
11	0		
15	0		
25	0		
28	1	730.	
29	0		
30	0		
31	1	310.	
41	0		
9999			

DLAD			No. máximo	Capacidade	Custo
Barra Início	Barra Fim	X(%)	Ctos. paralelos	(MW)	(%)
40	45	22.05	4	180	14.00
18	20	19.97	4	200	12.73
27	38	20.80	4	200	13.24
35	38	19.80	4	200	12.63
37	42	21.05	4	200	13.39
39	42	20.30	4	200	12.94
44	45	18.64	4	200	11.93
9	14	17.56	4	220	11.27
13	18	18.05	4	220	11.57
14	26	16.14	4	220	10.41
24	34	16.47	4	220	10.61
8	13	13.48	4	240	8.795
14	18	15.14	4	240	9.805
24	33	14.48	4	240	9.400
4	11	22.46	4	240	14.25
1	7	6.16	4	270	4.35
1	2	10.65	4	270	7.075
4	9	9.24	4	270	6.215
5	9	11.73	4	270	7.730
5	8	11.32	4	270	7.480
7	8	10.23	4	270	6.825
4	5	5.66	4	270	4.045
2	5	3.24	4	270	2.580
12	14	7.40	4	270	5.105
13	20	10.73	4	270	7.125
14	22	8.40	4	270	5.710
22	26	7.90	4	270	5.410
20	23	9.32	4	270	6.270
23	24	7.74	4	270	5.310
26	27	8.32	4	270	5.660
33	34	12.65	4	270	8.290
27	36	9.15	4	270	6.165
36	37	10.57	4	270	7.025
34	35	4.91	4	270	3.590
37	39	2.83	4	270	2.330
37	40	12.81	4	270	8.390
40	42	9.32	4	270	6.270
38	42	9.07	4	270	6.115
42	44	12.06	4	270	7.935
2	4	8.82	4	270	5.965
14	15	3.74	4	270	2.885
5	11	9.15	4	270	6.165
27	29	9.98	4	270	6.670
26	29	5.41	4	270	3.895
28	43	4.06	4	1200	46.70
28	41	3.39	4	1300	39.29
16	32	3.11	4	1400	36.22
32	43	3.09	4	1400	35.96
19	25	3.25	4	1400	37.75
25	32	3.19	4	1400	37.11
32	41	3.09	4	1400	35.96
19	21	2.78	4	1500	32.63
31	41	2.78	4	1500	32.63
17	32	2.32	4	1700	27.52
19	32	1.95	4	1800	23.43
46	19	2.22	4	1800	26.37
46	16	2.03	4	1800	24.32
46	3	2.03	4	1800	24.32
16	28	2.22	4	1800	26.37
16	17	0.78	4	2000	10.51
17	19	0.61	4	2000	8.715
46	10	0.81	4	2000	10.89
46	6	1.28	4	2000	16.01
21	25	1.74	4	2000	21.12

31	32	0.46	4	2000	7.050
28	31	0.53	4	2000	7.820
28	30	0.58	4	2000	8.330
41	43	1.39	4	2000	17.29
18	19	1.25	4	600	8.160
20	21	1.25	4	600	8.160
42	43	1.25	4	600	8.160
15	16	1.25	4	600	8.160
46	11	1.25	4	600	8.160
24	25	1.25	4	600	8.160
29	30	1.25	4	600	8.160
40	41	1.25	4	600	8.160
2	3	1.25	4	600	8.160
5	6	1.25	4	600	8.160
9	10	1.25	4	600	8.160

9999

DUSI

Numero da Usina	Barra	Pgmin (MW)	Pgmax (MW)
1	14	0.	944.
2	16	0.	1366.
3	17	0.	1000.
4	19	0.	773.
5	27	0.	54.
6	28	0.	730.
7	31	0.	310.
8	32	0.	450.
9	34	0.	221.
10	37	0.	212.
11	39	0.	221.
12	46	0.	599.

9999

FIM

Nro. Ctos. analisáveis

10

C.2. Dados para o Sistema Teste SE79

DBAR			
Numero da Barra	Tipo	Pgerada (MW)	Pcarga (MW)
12	0		
21	1	1740.	
27	2	3390.	958.
33	1	272.	
37	1		62.
38	1	352.	95.
39	1	185.	203.
40	1	60.	178.
41	1	120.	633.
53	0		
200	1	936.	9580.
201	1	1531.	499.
202	1	425.	45.
203	1	4982.	718.
204	1	544.	147.
205	1		134.
206	1	1174.	592.
207	0		
208	1	234.	391.
209	1	1429.	
210	0		
211	1	2953.	
212	1	1266.	
213	0		
214	1	279.	216.
215	0		
216	0		828.
217	0		
218	0		669.
219	1	323.	
220	1	1937.	372.
221	0		542.
222	0		
223	0		1007.
224	1	939.	
225	1	407.	401.
226	0		
227	1	531.	398.
228	1		8.
229	0		151.
230	0		
231	1		470.
232	1	2182.	67.
233	0		
234	1	1257.	7423.
235	1	278.	1107.
236	0		151.
237	1	231.	
238	1	409.	287.
239	1	143.	1156.
240	1	88.	829.
241	1	1116.	
242	1	766.	
243	1	97.	
246	1	549.	882.
247	0		807.
249	1	118.	994.
250	0		
251	1	2798.	

252	0		633.
254	0		647.
255	1	188.	848.
256	0		1712.
257	0		
260	0		
261	0		
262	0		
263	0		
267	1	954.	1159.
272	0		
273	0		
9999			
DLIN			
Barra Inicio	Barra Fim	X(%)	Capacidade (MW)
243	267	6.81	600
267	272	4.93	600
260	254	2.69	1100
201	33	0.34	1100
201	202	1.85	1100
201	202	1.85	1100
202	204	1.34	1100
204	205	1.78	1100
202	205	3.07	1100
202	203	3.70	1100
205	210	3.53	1100
205	210	3.53	1100
210	256	1.71	1100
210	256	1.71	1100
261	53	0.92	2200
261	53	0.92	2200
261	53	0.92	2200
21	53	0.78	2200
21	53	0.78	2200
21	53	0.78	2200
12	21	0.91	2200
12	21	0.91	2200
12	21	0.91	2200
37	40	4.92	200
37	40	4.92	200
38	40	3.37	200
38	41	13.20	200
38	39	5.30	200.
38	39	5.30	200
39	41	8.48	200
263	41	19.20	200
205	208	2.30	1100
208	216	1.75	1100
260	223	2.44	1100
260	223	2.44	1100
260	208	3.98	1100
260	208	3.98	1100
260	208	3.98	1100
260	208	3.98	1100
260	216	4.92	1100
260	256	2.52	1100
216	254	2.69	1100
216	256	2.42	1100
255	256	4.08	1100

206	255	5.32	1100
206	216	5.46	1100
203	216	6.21	1100
203	216	6.21	1100
203	206	2.45	1100
203	208	5.12	1100
203	208	5.12	1100
203	208	5.12	1100
203	208	5.12	1100
200	233	1.41	1200
213	214	2.45	600
214	246	6.27	600
214	219	1.38	600
219	227	2.76	600
219	224	3.51	600
224	227	0.75	600
224	241	4.14	600
224	225	1.03	600
225	241	3.29	600
221	224	6.18	600
221	224	6.18	600
221	241	4.23	600
221	241	4.23	600
229	241	2.00	600
227	229	5.70	600
227	229	5.70	600
212	215	3.10	1200
212	215	3.10	1200
215	222	2.64	1200
222	228	2.86	1200
200	217	1.47	1200
217	228	3.27	1200
228	234	2.55	1350
228	234	2.55	1350
228	232	1.51	1200
232	234	1.72	1200
232	234	1.72	1200
232	234	1.72	1200
200	228	2.47	1200
211	220	2.16	1200
250	251	2.36	1300
250	251	2.36	1300
220	242	1.32	1200
226	242	1.47	1200
220	273	2.98	1200
231	273	3.03	1200
242	273	2.69	1200
240	257	2.24	1200
226	231	4.87	1200
226	257	6.26	1200
231	240	2.52	1200
246	247	6.05	600
246	247	6.05	600
247	249	5.62	600
247	249	5.62	600
215	217	2.58	1200
229	243	6.74	600
229	236	3.29	600
236	243	3.80	600
229	235	7.24	600

228	233	1.21	1200
235	252	2.17	600
218	221	3.95	600
262	218	2.82	600
262	221	6.58	600
262	221	6.58	600
262	221	6.58	600
230	241	6.24	600
230	241	6.24	600
230	237	6.21	600
230	237	6.21	600
237	238	8.65	600
237	238	8.65	600
238	239	7.43	600
238	239	7.43	600
243	252	3.95	600
207	209	1.47	1200
209	211	2.47	1200
209	226	5.21	1200
207	212	2.10	1200
12	27	0.34	1650
12	27	0.34	1650
12	27	0.34	1650
12	27	0.34	1650
37	205	6.67	150
37	205	6.67	150
207	206	1.33	750
249	250	2.14	560
249	250	2.14	560
249	250	2.14	560
221	222	2.14	560
217	218	2.14	560
234	237	2.14	560
234	237	2.14	560
211	246	2.14	560
226	227	2.25	400
226	227	2.25	400
226	227	2.25	400
231	243	2.25	400
231	243	2.25	400
231	243	2.25	400
272	273	2.25	400
272	273	2.25	400
212	213	2.14	560
257	252	2.25	400
257	252	2.25	400
233	223	1.11	900
200	260	0.02	9999
200	261	0.02	9999
200	262	0.02	9999
200	263	0.02	9999

9999

DBAD

Numero da Barra	Tipo	Pgerada (MW)
43	0	
54	0	
60	0	
244	1	317.
245	0	
248	0	
253	1	499.
259	0	
9999		

DLAD			No. maximo	Capacidade	Custo
Barra Inicio	Barra Fim	X(%)	Ctos. paralelos	(MW)	(%)
243	67	6.81	3	600	27.05
267	72	4.93	3	600	17.6
260	54	2.69	3	1100	28.58
201	33	0.34	3	1100	3.573
201	2	1.85	3	1100	19.65
202	4	1.34	3	1100	14.29
204	5	1.78	3	1100	18.94
202	5	3.07	3	1100	32.69
202	3	3.70	3	1100	39.3
205	10	3.53	3	1100	37.52
210	56	1.71	3	1100	18.22
261	53	0.92	3	2200	86.77
21	53	0.78	3	2200	73.74
12	21	0.91	3	2200	85.94
37	40	4.92	3	200	4.078
38	40	3.37	3	200	2.799
38	41	3.20	3	200	10.96
38	39	5.30	3	200	4.398
39	41	8.48	3	200	7.037
263	41	9.20	3	200	15.99
205	8	2.30	3	1100	24.47
208	16	1.75	3	1100	18.58
260	23	2.44	3	1100	25.9
260	8	3.98	3	1100	42.34
260	16	4.92	3	1100	52.34
260	56	2.52	3	1100	26.8
216	54	2.69	3	1100	28.58
216	56	2.42	3	1100	25.72
255	56	4.08	3	1100	43.41
206	55	5.32	3	1100	56.63
206	16	5.46	3	1100	58.06
203	16	6.21	3	1100	66.1
203	6	2.45	3	1100	26.08
203	8	5.12	3	1100	54.49
200	33	1.41	3	1200	16.84
213	14	2.45	3	600	9.723
214	46	6.27	3	600	24.93
214	19	1.38	3	600	5.485
219	27	2.76	3	600	10.97
219	24	3.51	3	600	13.96
224	27	0.75	3	600	2.992
224	41	4.14	3	600	16.45
224	25	1.03	3	600	4.114
225	41	3.29	3	600	13.09
221	24	6.18	3	600	24.56
221	41	4.23	3	600	16.83
229	41	2.00	3	600	7.978
227	29	5.70	3	600	22.69
212	15	3.10	3	1200	37.07
215	22	2.64	3	1200	31.52
222	28	2.86	3	1200	34.21
200	17	1.47	3	1200	17.55
217	28	3.27	3	1200	39.04
228	34	2.55	3	1350	30.45
228	32	1.51	3	1200	18.09
232	34	1.72	3	1200	20.6
200	28	2.47	3	1200	29.55
211	20	2.16	3	1200	25.79
250	51	2.36	3	1300	56.7

220	42	1.32	3	1200	17.39
226	42	1.47	3	1200	19.43
220	73	2.98	3	1200	39.41
231	73	3.03	3	1200	40.15
242	73	2.69	3	1200	41.63
240	57	2.24	3	1200	29.6
226	31	4.87	3	1200	64.39
226	57	6.26	3	1200	82.89
231	40	2.52	3	1200	33.3
246	47	6.05	3	600	21.59
247	49	5.62	3	600	20.07
215	17	2.58	3	1200	30.81
229	43	6.74	3	600	26.8
229	36	3.29	3	600	13.09
236	43	3.80	3	600	15.08
229	35	7.24	3	600	28.8
228	33	1.21	3	1200	14.51
235	52	2.17	3	600	7.746
218	21	3.95	3	600	15.71
262	18	2.82	3	600	11.22
262	21	6.58	3	600	23.47
230	41	6.24	3	600	24.81
230	37	6.21	3	600	24.68
237	38	8.65	3	600	30.87
238	39	7.43	3	600	26.52
243	52	3.95	3	600	14.08
207	9	1.47	3	1200	17.55
209	11	2.47	3	1200	29.55
209	26	5.21	3	1200	62.33
207	12	2.10	3	1200	25.07
27	0	4.37	3	1200	67.64
54	60	0.72	3	1200	25.76
200	60	1.11	3	1200	39.53
201	3	5.34	3	1100	56.81
240	45	3.75	3	1200	44.77
231	50	9.36	3	1200	111.9
220	50	4.49	3	1200	53.73
211	50	4.79	3	1200	57.31
248	50	1.87	3	1200	22.39
240	44	7.49	3	1200	89.55
244	45	7.49	3	1200	89.55
245	53	1.50	3	1200	17.91
211	12	3.22	3	1200	38.51
215	26	3.30	3	1200	39.4
235	37	3.62	3	600	12.91
235	38	6.74	3	600	24.06
246	49	0.52	3	600	37.55
248	51	7.71	3	1200	92.24
240	53	2.45	3	1200	32.38
231	57	1.68	3	1200	22.2
211	48	2.76	3	1200	32.95
216	55	2.69	3	1100	28.58
234	57	0.18	3	1200	12.64
226	59	2.25	3	1200	26.86
212	26	2.70	3	1200	32.24
222	26	3.75	3	1200	44.77
217	22	2.25	3	1200	26.86
209	12	3.15	3	1200	37.61
245	39	2.14	3	560	4.985
12	27	0.34	3	1650	11.69

37	5	6.67	3	150	3.578
207	6	1.33	3	750	6.102
249	50	2.14	3	560	4.985
221	22	2.14	3	560	4.985
217	18	2.14	3	560	4.985
234	37	2.14	3	560	4.985
211	46	2.14	3	560	4.985
226	27	2.25	3	400	4.617
231	43	2.25	3	400	4.617
272	73	2.25	3	400	4.617
212	13	2.14	3	560	4.985
257	52	2.25	3	400	4.617
233	23	1.11	3	900	6.357
200	60	0.02	3	9999	50.99
200	61	0.02	3	9999	50.99
200	62	0.02	3	9999	50.99
200	63	0.02	3	9999	50.99
201	43	1.33	3	750	6.102
53	54	0.34	3	1650	11.69
210	41	6.67	3	150	3.578
210	60	1.33	3	750	6.102
248	47	2.14	2	560	4.985
216	15	1.33	3	750	6.102
255	59	1.33	3	750	6.102

9999

DUSI

Numero da Usina	Barra	Pgmin (MW)	Pgmax (MW)
1	12	0.	
2	21	0.	1740.
3	27	0.	3390.
4	33	0.	272.
5	37	0.	
6	38	0.	352.
7	39	0.	185.
8	40	0.	60.
9	41	0.	120.
10	53	0.	
11	200	0.	936.
12	201	0.	1531.
13	202	0.	425.
14	203	0.	4982.
15	204	0.	544.
16	205	0.	
17	206	0.	1174.
18	207	0.	
19	208	0.	234.
20	209	0.	1429.
21	210	0.	
22	211	0.	2953.
23	212	0.	1266.
24	213	0.	
25	214	0.	279.
26	215	0.	
27	216	0.	
28	217	0.	
29	218	0.	
30	219	0.	323.
31	220	0.	1937.
32	221	0.	
33	222	0.	
34	223	0.	

35	224	0.	939.
36	225	0.	407.
37	226	0.	
38	227	0.	531.
39	228	0.	
40	229	0.	
41	230	0.	
42	231	0.	
43	232	0.	2182.
44	233	0.	
45	234	0.	1257.
45	235	0.	278.
46	236	0.	
47	237	0.	231.
48	238	0.	409.
49	239	0.	143.
50	240	0.	88.
51	241	0.	1116.
52	242	0.	766.
53	243	0.	97.
54	245	0.	
55	246	0.	549.
56	247	0.	
57	249	0.	118.
58	250	0.	
59	251	0.	2798.
60	252	0.	
61	254	0.	
62	255	0.	188.
63	256	0.	
64	257	0.	
65	260	0.	
66	261	0.	
67	262	0.	
68	263	0.	
69	267	0.	954.
70	272	0.	
71	273	0.	
75	244	0.	317.
76	248	0.	
77	253	0.	499.

9999

FIM

Nro. Ctos. analisáveis

10

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Romero, A. Monticelli, "A hierarchical decomposition approach for transmission network expansion planning", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 1, 1994, pp. 373-380.
- [2] S. Binato, G.C. Oliveira, "Multi-year expansion planning of large transmission networks", Artigo apresentado no *IV Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (SEPOPE'94)*, Foz do Iguaçu, Brasil, 1994.
- [3] L.L. Garver, "Transmission network estimation using linear programming", *IEEE Transactions on PAS*, Vol. PAS-89, No. 7, 1970, pp. 1688-1697.
- [4] R.C.G. Teive, E.L. Silva, L.G. Fonseca, "A cooperative expert system for transmission expansion planning of electrical power systems", Artigo aprovado para ser publicado no *IEEE Transactions on Power Systems*, 1997.
- [5] R. Romero, R.A. Gallego, A. Monticelli, "Transmission system expansion planning by simulated annealing", *IEEE Transactions on Power Systems*, 1995, pp. 278-283.
- [6] R. Romero, R.A. Gallego, A. Monticelli, "Comparative studies on non-convex optimization methods for transmission network expansion planning", *Proceedings of the 20th International Conference on Power Industry Computer Applications (PICA)*, 1997, pp. 24-30.
- [7] S. Binato, G.C. Oliveira, J.L. Araújo, "A greedy randomized adaptative search procedure for transmission expansion planning". Artigo aprovado para ser publicado no *IEEE Transactions on Power Systems*.
- [8] F. Wen, C.S. Chang, "Transmission network optimal planning using the tabu search method", *Electric Power Systems Research*, No.42, 1997, pp. 153-163.
- [9] J.C. Kaltenbatch, J. Peshon, E.H. Gehrig, "A mathematical optimization technique for the expansion of electrical power transmission systems", *IEEE Transactions on PAS*, Vol. PAS-89, No. 1, 1970, pp. 113-119.
- [10] Y.P. Dusonchet, A.H. El-Abiad, "Transmission planning using discrete dynamic optimization", *IEEE Transactions on PAS*, Vol. PAS-92, 1973, pp. 1358-1371.

- [11] R. Fischl, W.R. Puntel, "Computer aided design of electric power transmission network", artigo C72-168-8, apresentado no *IEEE Winter Power Meeting, New York, NY, 1972*.
- [12] A. Monticelli, et alli, "Interactive transmission network planning using a least effort criterion", *IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-101, No. 10, 1982*, pp. 3919-3925.
- [13] M.V.F. Pereira, L.M. Pinto, S.H. Cunha, G.C. Oliveira, "A decomposition approach to automated generation-transmission expansion planning", *IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-104, No. 11, 1985*.
- [14] L.M. Pinto, A. Nunes, M.V. Pereira, "Um modelo computacional para determinação de alternativas de expansão de custo mínimo em planejamento de sistemas de transmissão", artigo apresentado no *X Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTE'89), 1989, Curitiba (PR), Brasil*.
- [15] G.C. Oliveira, A.P. Costa, S. Binato, "Large Scale Transmission network planning using optimization and heuristic techniques", artigo aceito para a *IEEE/PES Winter Meeting, New York, NY, 1995*.
- [16] A.M. Geoffrion, "Generalized benders decomposition", *Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 10, 1972*.
- [17] J.F. Benders, "Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems", *Numerische Mathematik, Vol. 4, 1962*.
- [18] R. Romero, A. Monticelli, "A zero one implicit enumeration method for optimizing investments in transmission expansion planning", *IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, 1993*.
- [19] F. Glover, "Tabu search part I", *ORSA Journal on Computing, 1, 1989*, pp. 190-206.
- [20] F. Glover, "Tabu Search Part II", *ORSA Journal on Computing, 2, 1990*, pp. 4-32.
- [21] F. Glover, "Tabu thresholding: improved search by nonmonotonic trajectories". *ORSA Journal on Computing, Vol. 7, No. 4, 1995*, pp. 426-442.
- [22] M. Laguna, "A guide to implementing tabu search", *Investigación Operativa Vol 4, No. 1, 1994*, pp. 5-25.

- [23] M.V.F. Pereira, "Aplicação de análise de sensibilidade no planejamento da expansão de sistemas de geração/transmissão", *Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1995.*